



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Faculdade de Engenharia

Desenvolvimento de um veículo eletromecânico para transporte individual sobre neve

Gonçalo Carrilho Farias Lopes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Paulo Manuel Oliveira Fael

Covilhã, Outubro de 2017

Agradecimentos

Os primeiros e maiores agradecimentos vão para os meus familiares que me deram e continuam a dar uma grande formação tanto pessoal como profissional, que vou demonstrar na continuação do meu futuro. Na formação académica, agradeço a oportunidade cedida pelos meus pais, de facultar o curso e a universidade que sempre desejei.

Seguidamente, gostaria de agradecer ao meu orientador, professor Paulo Fael, por me ter guiado e ajudado nos tempos de maior dificuldade, com a sua visão técnica experiente e inspirada, através deste longo caminho percorrido ao realizar esta dissertação.

Para finalizar, gostaria de agradecer também, aos meus amigos mais próximos, por tudo o que caracteriza uma grande amizade. Têm sido como pilares, tanto nos bons como nos maus momentos.

Resumo

Esta dissertação aborda todo o processo de desenvolvimento de um produto eletromecânico, mais especificamente um veículo elétrico individual de pequeno/médio porte, para deslocação na neve.

Numa primeira introdução vai ser caracterizada a falha no mercado identificada para a escolha do desenvolvimento de um produto deste género. É descrito todo o processo de estudo do mercado em questão, dos produtos existentes e de possíveis soluções para o preenchimento da lacuna existente no mercado. Será ainda definido o tipo de produto bem como todas as suas características.

Seguidamente é efetuado um estudo tanto do solo como da mecânica envolvida no movimento do veículo neste tipo de solo. São também efetuados todos os cálculos necessários para o desenvolvimento físico do produto.

Numa fase posterior, demonstra-se o projeto CAD do produto, tendo em conta todas as características definidas no início da dissertação. É também efetuado o estudo mecânico e elétrico do veículo, enunciando todos os componentes mecânicos e elétricos e características do produto final.

Finalmente é elaborada uma conclusão onde é discutido todo o processo de projetação, objetivos atingidos, dificuldades encontradas e ainda possíveis melhorias ou produtos futuros.

Palavras-chave

Eletromecânico, veículo elétrico individual, neve, lacuna no mercado, mecânica do movimento, projeto CAD, componentes mecânicos e elétricos.

Abstract

This dissertation approaches the process of engineering an electromechanic product, more specifically a small to medium sized, individual and electrical snow vehicle.

In a small introduction, a gap in the market is identified and characterized, for the development of such a product. A market research is performed, where it is identified the current existent products, as well as possible solutions to complete that gap in the market.

Next is a study of the soil as well as the mechanics behind the movement of the vehicle in this type of soil. It's calculated all the mechanical parameters needed for the engineering process of the product.

In a next step, it is shown the CAD design process, where all the product characteristics that we've talked about in the beginning, are in place. It's shown the mechanical and electrical study, stated the different components and even the characteristics of the final product.

Finally, a small conclusion is taken, where it talks about all the process of engineering such a product, the achieved goals and difficulties, and possible future solutions or even products.

Keywords

Eletromechanic, electrical snow vehicle, gap in the market, movement mechanics, CAD design, different components.

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento do tema	1
1.2.	Objetivos da dissertação	2
1.3.	Estrutura da dissertação	2
2.	Análise do mercado	4
2.1.	Identificação do problema	4
2.2.	Projetos similares	5
2.2.1.	Projetos caseiros	6
2.2.2.	Protótipos ou ideias	7
2.2.3.	Produtos existentes	8
2.3.	Ideias iniciais	9
2.4.	Características pré-projeção	13
3.	Mecânica da interação solo-veículo	15
3.1.	Introdução às características do solo	15
3.2.	Breve história dos veículos com lagartas	16
3.3.	Interação mecânica e reações	17
3.3.1.	Introdução	17
3.3.2.	Diferentes modelos	18
3.3.3.	Coesão e tensões de corte	20
3.3.4.	Relação entre pressão e afundamento	21
3.3.5.	Forças de resistência externas	23
3.3.6.	Esforço de tração	24
4.	Dimensionamentos e seleções	25
4.1.	Dimensionamento da Lagarta	25
4.2.	Dimensionamento do motor	28
4.2.1.	Dimensionamento	28
4.2.2.	Seleção do motor	31
4.3.	Dimensionamento da redução	34

4.4. Dimensionamento da bateria e do circuito de proteção	37
4.4.1. Dimensionamento e seleção da bateria	37
4.4.2. Seleção do circuito de proteção da bateria	41
4.5. Seleção do circuito de controlo do motor	42
4.5.1. Introdução ao controlo de motores BLDC	42
4.5.2. Seleção do controlador de velocidade.....	43
5. Produto final.....	45
5.1. Desenho CAD	45
5.2. Estudo de tensões	50
5.3. Características finais.....	52
5.4. Circuito elétrico do veículo.....	53
6. Conclusões e considerações finais.....	55
6.1. Objetivos atingidos	55
6.2. Possíveis melhorias	55
6.3. Trabalhos futuros	56
Referências Bibliográficas.....	57

Lista de Figuras

Fig. 2.1 - Diferentes veículos para a neve, não comercializáveis.	6
Fig. 2.2 - Ideias ou protótipos de veículos individuais para a neve.	7
Fig. 2.3 - Diferentes ideias ou protótipos de veículos individuais para a neve.	7
Fig. 2.4 - Veículo de combustão interna para todo o tipo de terreno, chamado <i>Shredder</i> .	8
Fig. 2.5 - Veículo elétrico para todo o tipo de terreno, chamado <i>Exodeck da SCARPAR</i> .	9
Fig. 2.6 - Sistema 1.	10
Fig. 2.7 - Sistema 2.	10
Fig. 2.8 - Sistema 3.	11
Fig. 2.9 - Sistema 4.	12
Fig. 2.10 - Conceito base para o projeto.	14
Fig. 3.1 - Diferentes interpretações da patente de <i>Edgeworth</i> , segundo <i>Bekker</i> [5].	16
Fig. 3.2 - Rede de elementos finitos da análise da deformação do solo [8].	19
Fig. 3.3 - Várias distribuições de pressões normal sob uma lagarta [10].	20
Fig. 4.1 - Diagrama de forças estáticas atuantes no veículo num plano inclinado.	28
Fig. 4.2 - Diagrama de forças estáticas atuantes no veículo num plano horizontal.	29
Fig. 4.3 - Constituintes do tipo de motor BLDC ou motor DC sem escovas [23].	32
Fig. 4.4 - Motor escolhido para o veículo em desenvolvimento.	33
Fig. 4.5 - Diagrama do sistema de redução, usada no veículo em desenvolvimento.	35
Fig. 4.6 - Comparação entre os diferentes tipos de baterias, variando quimicamente [19].	39
Fig. 4.7 - Circuito BMS escolhido (<i>HGX-D338</i>), para a proteger a bateria [22].	41
Fig. 4.8 - Simplificação da rotação do rotor de um motor BLDC [24].	42
Fig. 4.9 - Circuito de uma ponte H trifásica, usada no controlo de motores BLDC [24].	43
Fig. 4.10 - Controlador de velocidade de motores BLDC, pelo fabricante <i>Kelly</i> [25].	44
Fig. 5.1 - Desenho CAD do veículo desenvolvido nesta dissertação.	45
Fig. 5.2 - Desenho CAD do veículo dobrado.	46
Fig. 5.3 - Primeira ligação, entre o quadro e o banco, permitindo a dobragem do veículo.	46
Fig. 5.4 - Segunda ligação, entre banco e a estrutura principal da lagarta.	47
Fig. 5.5 - Componente desenvolvido para permitir a conexão entre o quadro e a lagarta.	48
Fig. 5.6 - Dobradiça e trinco, que permite a dobragem do garfo do veículo.	48
Fig. 5.7 - Caixa de proteção da bateria e da segunda redução de velocidade do motor.	49
Fig. 5.8 - Caixas de proteção da primeira redução e do motor do veículo.	49
Fig. 5.9 - Análise de tensões estáticas no veículo, usando o critério de <i>von Mises</i> .	50
Fig. 5.10 - Análise, mais detalhada, concentrações de tensões no veículo.	51
Fig. 5.11 - Análise concentrações de tensões no veículo, da estrutura principal da lagarta.	51
Fig. 5.12 - Análise do deslocamento provocado pelas forças aplicadas.	52

Fig. 5.13 - Diagrama das ligações elétricos do veículo em desenvolvimento.	53
Fig. 5.14 - Circuito elétrico requerido pelo controlador [25].	54

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tabela de decisão realizada de modo a selecionar o melhor veículo.	13
Tabela 2 - Parâmetros de resistência ao corte de solos [11].	21
Tabela 3 - Parâmetros de pressão-afundamento fornecidas por <i>Wong</i> [12].	22
Tabela 4 - Parâmetros de pressão-afundamento e de resistência ao corte da neve [12].	25
Tabela 5 - Valores assumidos para o dimensionamento da lagarta.	26
Tabela 6 - Valores inseridos no sistema, de modo a calcular forças de resistência externa.	27
Tabela 7 - Resultados obtidos ao utilizar as equações da subseção 3.3.	27
Tabela 8 - Valores inseridos nas equações anteriores.	30
Tabela 9 - Resultados obtidos resolver as equações anteriores.	30
Tabela 10 - Resultados obtidos com o fator de segurança.	30
Tabela 11 - Comparação entre motores BLDC e motores DC com escovas [16].	31
Tabela 12 - Características do motor escolhido [21].	33
Tabela 13 - Valores combinados das polias e das correias [17] e [18].	37
Tabela 14 - Características da célula de bateria escolhida para o dimensionamento [20].	39
Tabela 15 - Características principais do circuito BMS escolhida para a bateria [22]	42
Tabela 16 - Características principais do controlador escolhido para o veículo [25].	44
Tabela 17 - Dados das características técnicas do veículo desenvolvido	53

Lista de Acrónimos

CAD	Computer-aided design
FEM	Finite elements metod
DC	Direct-current
BLDC	Brushless direct-current motor
BMS	Battery management system
PWM	Pulse-width-modulation

Capítulo 1

1. Introdução

1.1. Enquadramento do tema

Esta dissertação descreve todo o processo de desenvolvimento de um veículo para deslocação nos mais variados tipos de terreno, mais especificamente, em terrenos com grande quantidade de neve.

Numa primeira fase, este tema surgiu depois de alguma introspeção sobre todo o processo da prática de desportos de inverno, onde ocorreu a realização da existência de uma possível lacuna no mercado. Nas estâncias ou resorts de ski, independentemente do tipo de desporto, todos os praticantes usam algum tipo de transporte para serem elevados para o topo das pistas de ski dessas estâncias ou resorts de ski, para posteriormente procederem à descida das mesmas.

Um tipo de transporte fornecido por estas estâncias ou resorts, são os teleféricos ou “telecadeiras”, que é o tipo de transporte mais usual devido à sua eficiência. Esta eficiência é relacionada com o número de passageiros transportados por hora, sendo assim o tipo de meio de elevação com menos filas de clientes. Esta mesma eficiência varia, como é obvio, com a capacidade desses teleféricos, pois existe um grande número de diferentes tipos. Este tipo de transporte é ainda o mais seguro e cómodo para os clientes, pois a deslocação é efetuada através do ar. Onde há riscos associados, ainda que reduzidos, é no embarque ou no desembarque.

Os teleféricos são mais usuais em estâncias ou *resorts* de ski com uma grande quantidade de quilómetros de pistas, com grande elevação, e mesmo com uma grande quantidade de turistas ou clientes.

Existem ainda vários meios de transporte terrestre, com várias denominações, desde o “puxa-rabos” ou *T-bar Ski Lift*, até mesmo um tipo de passadeiras rolantes. Este tipo de transporte é usual em *resorts* ou estâncias de ski com pistas de relativamente pequena dimensão ou elevação. Estes possuem uma maior complexidade de embarque, onde clientes com menos experiência demonstram alguma dificuldade, surgindo até casos em que os praticantes contraem lesões devido a quedas graves. Assim, neste caso de transporte, a eficiência de transporte de clientes por hora é mais baixa, resultando assim em maiores tempos de espera.

Existe ainda a prática de desportos de inverno em locais isolados, designado por *Freeride*, isto é, em espaços longe da civilização e das estâncias ou *resorts* de ski enunciados anteriormente. Este tipo de desporto é realizado em plena natureza onde os únicos meios de transporte são helicópteros, no caso de grandes picos montanhosos, motas de neve, para a deslocação de grandes distancias até esses pontos afastados, ou mesmo a pé.

Foi neste ultimo ponto que surgiu a lacuna identificada para a realização desta dissertação, apesar de o veículo desenvolvido ser uma possível solução também para o caso das estâncias ou *resorts*. Pode ainda servir como solução para o mercado de clientes que queiram usufruir de um veículo deste género apenas para transporte em cidades com grandes nevões. Estes é o mercado alvo deste produto.

Posto isto, a solução encontrada de forma a fornecer uma alternativa para o problema enunciado é um veículo elétrico individual de lagartas com a possibilidade de ser dobrado de forma a facilitar o seu transporte e a sua arrumação.

1.2. Objetivos da dissertação

Como já foi dito anteriormente, esta dissertação tem como propósito o desenvolvimento de um produto de forma a fornecer alternativas a certo tipo de mercado alvo.

Para fornecer este produto, é necessário o estudo completo dos aspetos que o enquadram e caracterizam, isto é, o objetivo é fazer um estudo aprofundado tanto do mercado em que o produto estará inserido, como da análise do meio em que o veículo irá atuar, bem como de toda a componente de projeto do veículo.

Assim, esta análise aprofundada de todos esses aspetos, tem como intuito a fornecimento do melhor produto possível de forma a satisfazer as necessidades do mais alargado grupo de usuários deste tipo de produto.

1.3. Estrutura da dissertação

A estrutura, como já foi sugerida anteriormente, consiste primeiramente em apresentar a ideia geral da dissertação fornecendo o conceito, os objetivos primários do trabalho e a sua estruturação.

Numa fase seguinte, será analisado todo o conceito do produto, isto é, uma análise detalhada do problema encontrado, do mercado em que o produto se encontra, fornecendo seguidamente possíveis soluções ou alternativas bem como a solução escolhida e as suas principais características.

Posteriormente é estudado todo o meio em que o veículo irá atuar, isto é, um estudo detalhado da neve. Realiza-se de seguida uma análise, com respetivos cálculos, da interação mecânica entre solo e veículo.

No capítulo seguinte é desenvolvido o produto, usando o programa de desenho *CAD SolidWorks*, com o intuito de encontrar o *design* adequado. É ainda feito uma análise mecânica do veículo relativamente a tensões sofridas durante o transporte do utilizador.

Sucessivamente, encontram-se todas as características principais do produto final, apresentando todos os componentes (mecânicos e elétricos), bem como o circuito elétrico final.

Para finalizar, apresentam-se todas as considerações finais, indicando os objetivos que foram atingidos, possíveis melhorias a realizar, ou mesmo até produtos futuros.

Capítulo 2

2. Análise do mercado

Para o projeto de um produto adequado às necessidades do público alvo, é necessária uma análise detalhada de toda a envolvente desse produto, isto é, um estudo aprofundado do mercado.

2.1. Identificação do problema

Numa primeira fase, todos os tipos de produtos surgem com a identificação de algum tipo de lacuna ou problema nas mais variadas áreas. No caso do produto desenvolvido por esta dissertação, a oportunidade surgiu ao detetar poucas soluções no mercado para o problema de deslocação em meios com grandes quantidades de neve.

Como já foi mencionado anteriormente, esta oportunidade de negócio, se é que pode ser chamado assim, surgiu ao examinar toda a vertente de desportos de inverno, onde se teve em conta todos os meios existentes para o transporte não só de pessoas em estâncias ou *resorts* de ski, como também à vertente de transporte dos praticantes para zonas mais isoladas no meio de montanhas.

No caso do transporte de clientes para o topo das pistas de ski, nos *resorts* ou estâncias, o modo mais usual é o de uso de teleféricos para a grandes deslocações tanto em distância como em altitude. Este tipo, não só é o mais eficiente devido à grande capacidade de transporte de pessoas por unidade de tempo, como também é considerado o mais seguro. Existem casos onde o teleférico fica estático tanto na entrada como na saída de passageiros, existindo assim risco nulo para os mesmos sofrerem lesões. A parte que poderá ser considerada mais perigosa será a deslocação do teleférico através do ar, onde em casos muitos extremos, pode acontecer algo com os cabos de aço que suportam e transportam os teleféricos. Uma das grandes desvantagens deste tipo de transporte é o elevado custo de implementação.

Existem ainda o outro tipo de meios de transporte de praticantes, os meios terrestres, por exemplo o *T-bar Ski Lift*, ou as passadeiras rolantes que já foram explicados minimamente no capítulo anterior. Estes sim, acarretam certo risco para os utentes, pois, mais na entrada do que na saída, é necessária alguma experiência. Nestes, a dificuldade é alta comparando com o caso dos teleféricos. Normalmente é nestes casos onde ocorrem quedas e possíveis lesões, e para além do facto de o número de passageiros por hora ser pequeno, havendo assim a tendência para o aparecimento de engarrafamentos ou filas. Desta forma, este tipo de

transporte é o menos seguro e o menos eficiente, apesar de ser só utilizado em transporte de passageiros em pequenas pistas, ou até mesmo pequenas instâncias de ski. Porém, é o sistema mais barato a ser aplicado.

Uma possível solução para os clientes que não queiram estar sujeitados a grandes tempos de espera, seria um veículo individual que fosse usado para o transporte para o topo da pista, ou da estância. Neste caso existiria o problema da descida, onde poderiam ser usadas duas soluções. Imaginemos que o veículo seria fornecido pela estância, onde possuía um passe ou *forfait* e no início da subida era-lhe fornecido um destes veículos, e no topo o cliente devolvia o veículo, procedendo assim à descida normalmente. Outra solução seria, estes veículos pertencerem ao cliente, e na parte da descida, seria possível dobrar e colocar o veículo às costas, em algum tipo de mochila ou mala.

Foi também estudado o caso da deslocação para zonas fora de instâncias ou resorts, isto é, para zonas isoladas no meio da montanha. Nestes casos os meios de transporte mais usuais são as motas de neve e/ou helicópteros. Normalmente os praticantes alugam uma mota de neve para se deslocarem até à base de picos montanhosos, procedendo posteriormente à subida do pico a pé, onde de seguida o descem, praticando o seu desporto. Em casos mais extremos essa subida para o pico, é realizada através de helicóptero.

Desta forma, analisando todas estas questões, surgiu o tema para a dissertação. Assim, o objetivo da dissertação é fornecer algum tipo de solução alternativa para a deslocação dos praticantes de desportos de inverno para qualquer que seja o seu destino, tanto para os topos das estâncias de ski, como para as bases de picos montanhosos.

2.2. Projetos similares

Após a identificação de uma área para a qual existe a possibilidade de implementação de um produto, há que investigar o mercado por projetos que ocupem a necessidade do mercado encontrada.

Alguns desses produtos já foram mencionados anteriormente. No caso do mercado das estâncias, existem os teleféricos, ou os “puxa-rabos” ou *T-bar Ski Lift*, ou ainda passadeiras rolantes. Em relação ao mercado do *Freeride* o transporte pode ser realizado por motas de neve, helicópteros ou mesmo a pé. Mas o intuito da dissertação é o desenvolvimento de um produto substituto a estes meios, logo, este tipo de transportes de praticantes não irá ser estudado a fundo nesta dissertação.

Deste modo vai-se realizar uma análise dos produtos existentes no mercado, não só para conhecer a possível concorrência ao produto, como também para assim projetar um produto diferente, mesmo que possua alguma inspiração de outros veículos.

De seguida vão ser examinados os diferentes tipos de projetos, dos quais alguns estão em fase de conceito, outros são já um produto no mercado, e outros são projetos desenvolvidos por indivíduos sem a intenção da produção em grandes quantidades, isto é, foram desenvolvidos para o seu belo prazer. Vou chamar estes últimos de projetos caseiros.¹

2.2.1. Projetos caseiros

Este tipo de projetos são realizados por indivíduos comuns tendo como intuito apenas o seu lazer e não a comercialização desse mesmo produto. Na figura seguinte apresentam-se alguns desses produtos.

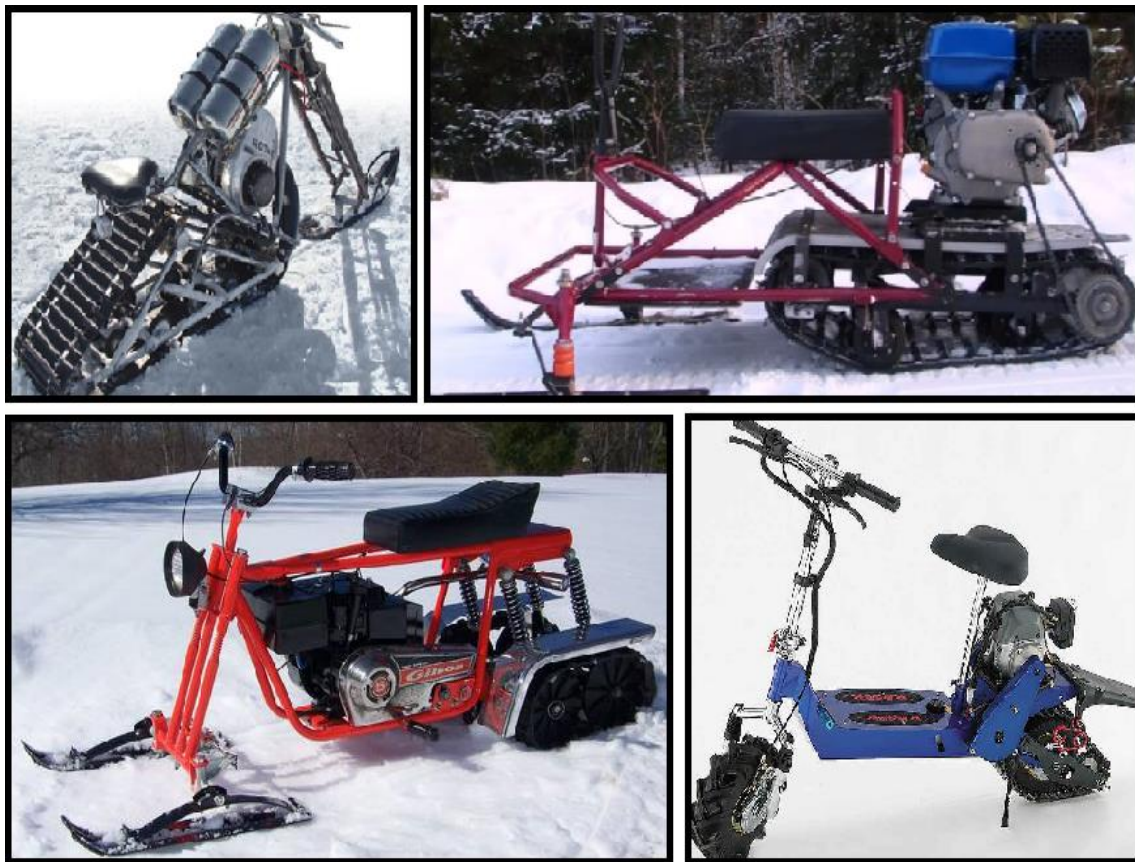


Fig. 2.1 - Diferentes veículos para a neve, não comercializáveis.

Ao analisar a Fig. 2.1, podemos verificar vários pontos. Um desses pontos é a predominância do uso de lagartas como meio de tração. Outro ponto a salientar é que, neste caso, todos possuem motores de combustão interna, devido à fácil acessibilidade que estes apresentam.

¹ Apenas referir que grande parte das imagens usadas nesta secção foram encontradas ou na secção de imagens do Google, ou em fóruns específicos. Como os autores das imagens são desconhecidos é difícil apresentar as devidas referências para as mesmas.

2.2.2. Protótipos ou ideias

Nesta subsecção apresentam-se alguns conceitos encontrados para o transporte de passageiros, uns mais arrojados que outros, em todos os tipos de terreno, como por exemplo a neve, ou até mesmo areia.



Fig. 2.2 - Ideias ou protótipos de veículos individuais para a neve.



Fig. 2.3 - Diferentes ideias ou protótipos de veículos individuais para a neve.

Nas figuras anteriores pode verificar-se já uma mudança do tipo de energia usada para o movimento destes veículos, passando para uma maioria de locomoção elétrica, tirando um ou dois casos, em que a energia usada é mecânica, através de pedais.

Pode verificar-se a predominância do uso de lagartas, como forma de transmissão de energia mecânica para o solo.

2.2.3. Produtos existentes

Por fim encontram-se os produtos já no mercado, tornando assim, os conceitos mais aceitáveis, devido à já existência de vendas.

O veículo apresentado na Fig. 2.4 é um veículo dobrável com um motor de combustão interna, possui duas lagartas, e onde o usuário anda em pé, do mesmo modo que um tipo de mota de água ou *Jetski*. Este veículo chama-se *Shredder*, projetado pela empresa *DTV Shredder*, comercializado por vários distribuidores por um preço de 4,499€. Este é o produto com capacidade de maior concorrência ao veículo desenvolvido nesta dissertação.



Fig. 2.4 - Veículo de combustão interna para todo o tipo de terreno, chamado *Shredder*.

O veículo da próxima figura é chamado Exodeck e é desenvolvido pela empresa SCARPAR. Como no caso anterior, também neste produto o usuário anda de pé, como se fosse um *skate* ou *snowboard*. Apesar do veículo ainda estar em desenvolvimentos finais, já é possível fazer encomendas, apesar de ainda não existir preço. Existem duas versões deste produto, sendo o da primeira imagem da Fig. 2.5 a última versão desenvolvida pela empresa.



Fig. 2.5 - Veículo elétrico para todo o tipo de terreno, chamado Exodeck da SCARPAR.

2.3. Ideias iniciais

Numa fase inicial foram estudadas formas de transmissão de energia mecânica para o solo, isto é, várias formas de tração mecânica, onde surgiram as famosas lagartas, rodas com grandes áreas de contacto e mesmo até rodas estilo parafuso usadas nuns tratores *Fordson* para a neve. Como foi encontrado na literatura, o meio de tração fornecido pelas rodas estilo parafuso, são pouco eficientes [1], requerendo assim grandes quantidades de energia. Estão também impossibilitados de atingir grandes velocidades [2]. Deste modo, o modo de tração escolhido para o projeto desta dissertação é o de uso de lagartas.

Posteriormente à etapa de analisar o mercado, verificando todo o tipo de produtos existentes, protótipos ou mesmo conceitos ou ideias, procedeu-se à conceção de várias ideias ou conceitos, de maneira a encontrar o melhor tipo de solução ou produto para satisfazer as necessidades dos utilizadores.

Nesta fase era sabido que o produto seria um veículo elétrico, de pequeno a médio porte, com capacidade de deslocar um passageiro, bem como o seu equipamento, através de solos com alguma inclinação e ainda com grande quantidade de neve.

De seguida, encontram-se imagens de rascunhos, realizados numa fase preliminar, dos diferentes conceitos imaginados para o tema da dissertação: um veículo eletromecânico como finalidade o transporte de um passageiro através de neve.

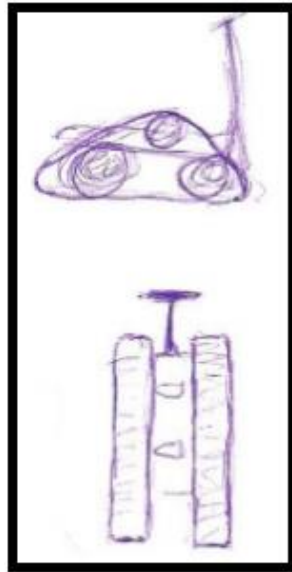


Fig. 2.6 - Sistema 1.

Este primeiro sistema, apresentado na Fig. 2.6, é veículo inspirado no veículo *Exodeck* enunciado na secção anterior. Este veículo seria de médio porte, com duas lagartas como meio de tração, onde o usuário operaria de pé. As vantagens deste sistema seriam:

- Potência;
- Viabilidade ou robustez;
- Versatilidade.

Porem, a maior desvantagem seria:

- Peso e porte.

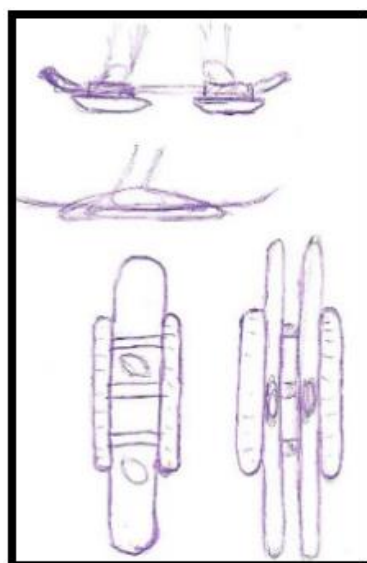


Fig. 2.7 - Sistema 2.

Na Fig. 2.7 encontra-se o conceito do sistema 2, tratando-se de um sistema eletromecânico que seria aplicado em pranchas de snowboard ou skis, com o intuito de transportar o praticante, onde de seguida, o praticante desmontava o sistema e o colocaria numa mochila, procedendo assim à descida da montanha tranquilamente. Este sistema teria como vantagens:

- Portabilidade;
- Apropriação a instâncias de ski;

E como desvantagens:

- Potência;
- Complexidade de projeto;
- Robustez.

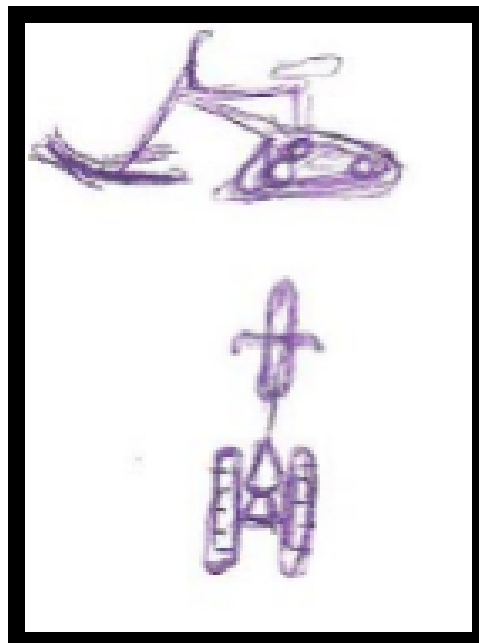


Fig. 2.8 - Sistema 3.

O conceito anterior, demonstrado na Fig. 2.8, consiste num veículo em formato de triciclo ou bicicleta, com o mesmo objetivo de todos os outros, mas neste caso, o usuário seria transportado numa posição mais agradável, isto é, sentado. Desta forma as distâncias de deslocação poderiam potencialmente ser mais elevadas. Assim este veículo possuiria as seguintes vantagens:

- Ergonomia;
- Robustez;
- Potência.

E ainda, como desvantagens:

- Peso e tamanho;
- Dificuldade em transportar material desportivo.

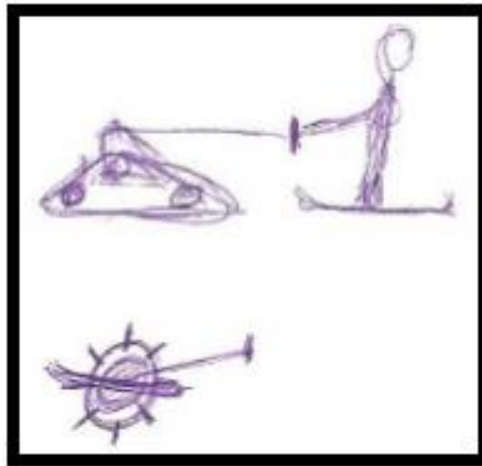


Fig. 2.9 - Sistema 4.

Por fim, o conceito da Fig. 2.9, trata-se de um sistema que seria usado para puxar o praticante, que se deslocaria com o seu material equipado, isto é, seria necessário que o utente possuísse uns skis ou uma prancha de snowboard para ser deslocado. Neste caso específico, potencialmente seria possível que o veículo seguisse o praticante na descida, fornecendo assim alguma margem de manobra para o peso e tamanho. Desta forma, as vantagens seriam:

- Robustez;
- Potência;
- Limite superior de tamanho;
- Possibilidade de seguir o praticante na descida.

Onde as desvantagens seriam:

- Dificuldade de projeto;
- Versatilidade.

Após a idealização dos quatro conceitos anteriormente enunciados, analisando devidamente as vantagens e desvantagens de cada um, procedeu-se à realização de uma tabela de decisão.

A tabela 1, consiste na determinação do melhor produto, de forma a satisfazer as necessidades do público alvo. Assim, foram escolhidos seis fatores que influenciam a escolha, aplicando determinado peso, conforme a importância de cada um.

Tabela 1 - Tabela de decisão realizada de modo a selecionar o melhor veículo.

Fatores	Porcentagem	Sistemas			
		1	2	3	4
Portabilidade	25%	4	8	7	5
Robustez	15%	8	5	7	7
Versatilidade	25%	8	6	7	6
Preço	10%	4	7	8	6
Autonomia	10%	7	5	6	7
Capacidade de transportar material de neve	15%	7	8	6	8
Total	100%	6,35	6,65	6,85	6,3

Ao analisar a tabela, podemos determinar que os maiores pesos foram atribuídos à portabilidade e à versatilidade, seguido pela robustez e pela capacidade de transporte de material adicional. Ao atribuir um valor de 0 a 10 para cada fator e para cada tipo de veículo ou sistema, pode-se concluir que o veículo do sistema 3 foi o vencedor com 6,85. Apesar de só possuir a pontuação mais alta no fator do preço, a média ponderada é superior, tornando-o assim no veículo mais abrangente e equilibrado, sendo assim, o sistema com mais capacidades de satisfazer as necessidades do público alvo.

2.4. Características pré-projeto

Definido o estilo do veículo, procede-se à caracterização, isto é, delinear claramente uma grande parte das principais características para o veículo, de modo a ir encontro às necessidades gerais do público-alvo.

Uma das características principais que o produto tem que possuir, é a capacidade de se poder dobrar, isto é, alguma forma de mecanicamente reduzir o seu porte, tanto para arrumação como para o transporte do mesmo. Em caso extremo, se possível, seria mais que vantajoso poder reduzir o tamanho do veículo de forma a colocá-lo em algum tipo de mochila ou mala para transporte, dependendo muito do seu peso. Esta característica dependerá muito do desenvolvimento e estudo durante a realização do projeto, estando sujeita a alterações se se verificar que compromete o grande esquema geral do veículo.

Uma outra característica importante é a de o veículo ser eletromecânico, tendo assim que possuir todo o conjunto de motor elétrico, baterias e controlos de forma a proporcionar a melhor experiência para o utilizador. Este atributo vai ser um grande influenciador em termos de peso e tamanho do veículo pois, para um veículo que vai transportar uma pessoa, em solos com grande profundidade de neve, durante algum tempo, vai ter que possuir grande potência e consequentemente grande capacidade de armazenamento de energia. Requer-se assim, o devido dimensionamento e desenvolvimento do veículo para encontrar a melhor relação peso-potência para um veículo deste género.

Por fim, mas não menos importante, o veículo terá que possuir a capacidade de se deslocar em solos com grandes quantidades de neve. Deste modo a relação entre peso e área de contacto terá que ser a adequada, de modo a proporcionar a devida tração mecânica. Para o efeito, o veículo será propulsionado através de lagartas como já foi anteriormente mencionado.

Também devido ao facto de o veículo atuar na neve, todos os componentes elétricos deverão estar bem isolados desta, para a possível ocorrência de avaria ser o mais reduzida possível.

Tendo em conta todas estas características, foram realizados vários rascunhos de conceitos dentro do tipo de veículo escolhido. Assim, desenvolveu-se o *design* geral do veículo, onde este estaria sujeito a mudanças conforme o projeto mecânico e elétrico. Desta forma, na Fig. 2.10 apresenta-se o conceito base numa fase pré-projeto.

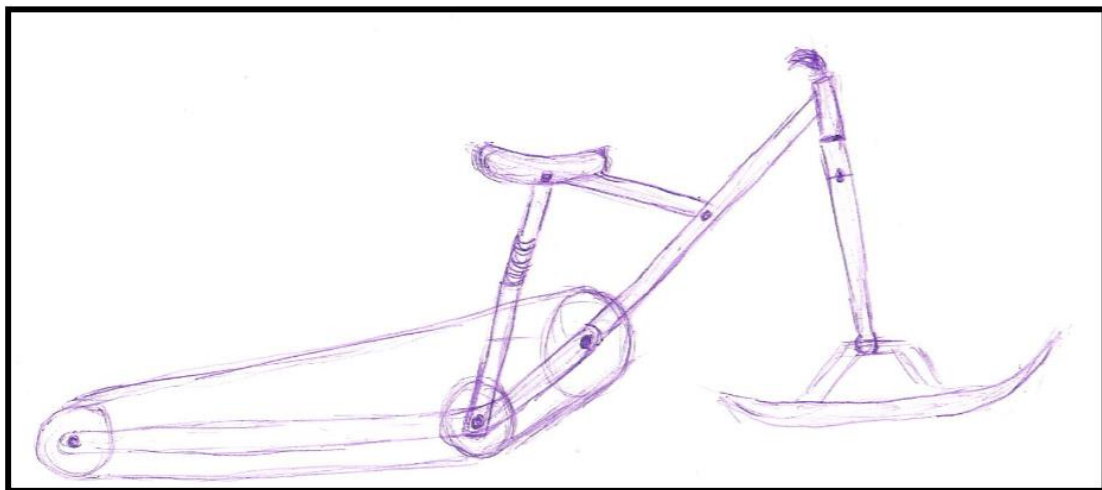


Fig. 2.10 - Conceito base para o projeto.

Nesta figura apresenta-se apenas o conceito base, isto é, a estrutura em si com os pontos de rotação, de modo a possibilitar a dobragem do quadro, para facilitar o transporte e a arrumação do veículo.

Capítulo 3

3. Mecânica da interação solo-veículo

No capítulo que decorre, é analisada toda a envolvente da interação mecânica entre o solo e o veículo. Desta forma, a análise da componente neve, que é o solo principal onde o veículo proposto pela dissertação se irá deslocar, é representada através de um estudo mecânico generalizado do solo. Isto é, a análise vai ter em consideração todos os tipos de solos, abrangendo areia, argila e como é obvio, neve.

Segundo *Terzaghi* [3], a mecânica dos solos é a aplicação das leis de mecânica e de hidráulica em problemas de engenharia que interagem com sedimentos ou qualquer outro tipo de acumulações de partículas de terreno produzidas pela degradação mecânica ou química de rochas, independentemente da existência de constituintes orgânicos.

A mecânica dos solos envolve teorias do comportamento do solo sobre tensões ou deformações impostas, suportadas por testes efetuados na investigação das propriedades físicas dos solos. Como o movimento de um veículo em qualquer tipo de terreno irá ser governado pelas leis de interação entre o solo e o veículo, é necessário analisar ambas as vertentes.

3.1. Introdução às características do solo

As propriedades mecânicas dos solos variam desde as propriedades da argila plástica até às propriedades da areia seca e/ou molhada. Estes são os extremos devido às características de cada solo. Nesta dissertação apenas se irão considerar os solos deformáveis.

Imagine-se que estamos a escavar um buraco em areia seca ou completamente saturada com água, todo o material das bordas tem tendência a entrar para o buraco, dificultando assim a continua escavação. Este comportamento deve-se às características físicas deste tipo de solo, mais especificamente, resulta de uma pequena ou nula conexão entre as partículas individuais da areia. Este fenómeno denomina-se como coesão do solo.

No outro extremo está a argila, onde por exemplo, é possível escavar um buraco com alguma profundidade, sem as paredes desmoronarem, indicando uma grande força de coesão entre as partículas individuais constituintes. Este solo possui grande plasticidade, sendo dos solos que impossibilita mais a tração mecânica.

Apesar da aparente simplicidade, as verdadeiras propriedades mecânicas de areia e argilas são muito dificilmente analisadas matematicamente. Assim, em modelos teóricos de mecânica dos

solos, são assumidas características mecânicas ideais de modo a simplificar a mecânica que envolve as propriedades físicas da areia e da argila. Estes modelos, por exemplo, assumem que a resistência ao corte dos solos ideais é completamente independente da intensidade de deformação, o que não é necessariamente o que acontece na realidade.

No caso da neve, que é o solo principal onde o veículo irá atuar, as características enunciadas anteriormente encontram-se a meio termo do espectro. Na secção 3.3, este aspeto irá ser analisado em maior detalhe.

3.2. Breve história dos veículos com lagartas

O desenvolvimento de veículos de lagartas começou no século XVIII (1770) onde o inventor *Richard Lovell Edgeworth*, em Inglaterra, patenteou o *design* [4]. A patente foi descrita como uma estrada artificial ou uma linha de comboio portátil, o qual tinha que se mover com a carruagem que lhe era aplicada. A Fig. 3.2 demonstra como era construída usando uma cintura de pedaços de madeira, que fazia ligação entre o veio frontal e o traseiro, formando assim a ideia de um veículo com lagarta [5].

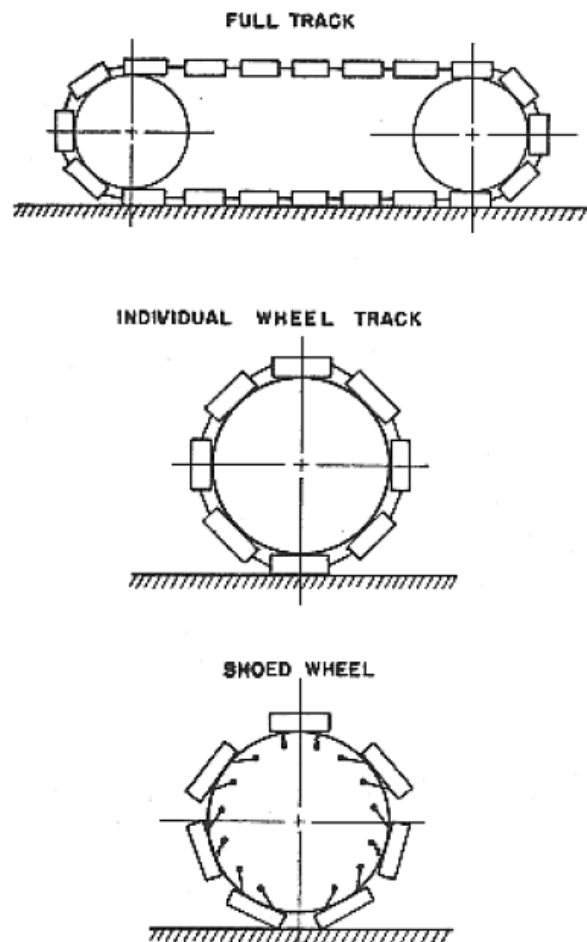


Fig. 3.1 - Diferentes interpretações da patente de *Edgeworth*, segundo *Bekker* [5].

Ao longo do século seguinte, foram patenteados diversos veículos com lagartas completas, mas nenhum parecido com o modelo atual de veículo de lagartas. Na época, existiam grandes dificuldades para o desenvolvimento deste tipo de veículos, desde a escassez de materiais capazes de resistir às cargas a que as lagartas estão sujeitas, até à grande quantidade de potência necessária. O aparecimento dos primeiros motores de combustão interna, permitiu um crescimento deste tipo de veículos, onde, posteriormente, na Primeira Grande Guerra, ocorreu um grande desenvolvimento aparecendo assim os primeiros tanques de guerra.

Depois da Primeira Grande Guerra, os veículos todo-terreno usados foram convertidos para serem usados em diversas aplicações pelos civis, inclusive na agricultura. Foi nesta altura que emergiu a mecânica da locomoção, onde, por tentativa e erro, as condições técnicas dos veículos de agricultura aumentaram.

Na Segunda Guerra Mundial, ocorreu outro grande desenvolvimento dos veículos todo-terreno onde foi melhorada toda a sua mecânica, desde o sistema de suspensão, até ao sistema de direção.

O *design* atual é um design que tem em consideração todo o desenvolvimento efetuado nesta área, tendo em conta a complexidade da mecânica do solo. Resultou assim em veículos com a capacidade de percorrer os mais difíceis terrenos a relativamente altas velocidades.

3.3. Interação mecânica e reações

3.3.1. Introdução

No início do desenvolvimento dos veículos de lagartas existia um fraco conhecimento da interação entre solo e lagarta, impossibilitando um desenvolvimento adequado. De modo a explicar e calcular as forças de resistência que atuam sob as lagartas, foi importado o conceito de coeficiente de fricção de *Coulomb* da mecânica dos sólidos. A simples assunção de que as forças de resistência eram diretamente proporcionais ao peso do veículo, dificultava tanto o seu desenvolvimento e projeto, como a compreensão física da interação entre o solo e a lagarta.

Outra teoria usada nos tempos primórdios do desenvolvimento deste tipo de veículos, foi a teoria de “*passive earth pressure*” de *Rankine* usada na mecânica dos solos. Esta, resumidamente, interliga a resistência do solo às forças externas que tendem à dissipação do mesmo [4].

Juntando as duas teorias, numa fase inicial, foi possível encontrar as equações fundamentais para a interação entre solo e veículo. Existiam assim, variados parâmetros que influenciavam

o desempenho dos veículos com lagartas, desde a centro de gravidade, diâmetro das rodas, o tamanho da lagarta e até mesmo a relação entre largura e comprimento da mesma.

3.3.2. Diferentes modelos

Nos últimos anos tem-se tentado incorporar diferentes teorias nesta área de estudo, de maneira a refinar a interação entre solo e lagarta, aperfeiçoando assim o design e a eficiência destes veículos. Entre as teorias mencionadas encontra-se, a teoria do equilíbrio plástico, o método de elementos finitos (FEM) e ainda o método de análise paramétrica de sistemas de lagartas.

3.3.2.1 Teoria do equilíbrio plástico

Esta teoria foi mencionada por Wong e Reece [6] e [7], aquando da sua extensiva investigação experimental na interação física entre o veículo e o terreno. Eles verificaram que existia uma relação entre o equipamento de tração do veículo e o desenvolvimento de zonas de falhas dos solos mais densos.

Foi concluído que ao exceder uma certa carga, um volume específico do terreno atingiria um estado de falha. Posteriormente, um aumento pequeno da carga resultaria num aumento rápido da tensão no solo, convertendo-se num fluxo plástico do solo. O estado que precede o fluxo plástico é referido como equilíbrio plástico. A condição de falha pelo fluxo plástico é determinada pela equação falha ao corte de *Mohr-Coulomb* (3.1):

$$\tau_{max} = c + p \tan \phi \quad (3.1)$$

onde c é a coesão aparente do solo, ϕ é o ângulo interno de resistência do solo, p é a pressão normal e τ_{max} é a tensão máxima de corte do solo. Existem outras equações que preveem a carga aplicada no solo pelo veículo, mas estas são extremamente complexas de resolver pois usam certa informação da interação veículo-terreno.

Assim, a teoria do equilíbrio plástico pode fornecer algum conhecimento físico sobre a interação entre o solo e o veículo. Esta teoria assume que o terreno se comporta como um material rígido e perfeitamente plástico, ou seja, apenas ocorre deformação após a falha devido a concentração de tensões. Este é um caso extremo pois os veículos de lagartas normalmente atuam muito aquém do limite de falha do solo, limitando assim a utilidade desta teoria no desenvolvimento de veículos de lagartas.

3.3.2.2 Método dos elementos finitos (FEM)

Este é um método numérico que pode ser usado de modo a obter uma solução precisa de problemas de engenharia complexos. Consiste basicamente em dividir um domínio ou região de soluções em sub-regiões (elementos finitos). Isto equivale à substituição de um domínio que possui infinitos graus de liberdade, por um sistema com graus de liberdade finitos. A Fig. 3.2,

demonstra um conjunto de elementos triangulares interligados para a análise da deformação do terreno debaixo de uma lagarta.

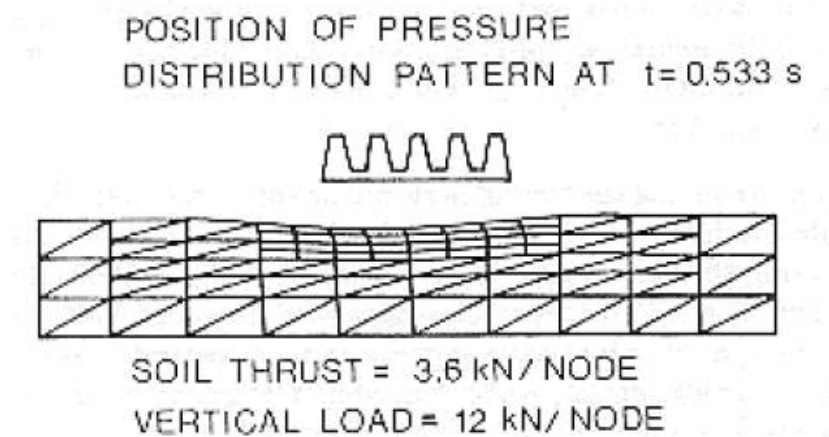


Fig. 3.2 - Rede de elementos finitos da análise da deformação do solo, por baixo de uma lagarta, segundo Karafiath [8].

Apesar de existir uma grande capacidade de computação nos dias que correm, a aplicação desde método é limitada em alguns casos, devido ao facto de o solo não ser homogéneo. Assim, o FEM requeria uma adicional informação sobre os constituintes do solo, o que por si, já é uma dificuldade acrescida.

3.3.2.3 Método da análise paramétrica

Este método, usado primeiramente por *Bekker* [5] e [9], como análise de sistemas de lagartas, assume que a lagarta em contacto com o solo se assemelha a uma peça rígida. Na Fig. 3.3, demonstram-se as variações assumidas na pressão realizada por uma lagarta no solo. Em 3.3b é demonstrada a distribuição de pressões considerando lagartas flexíveis, onde os picos evidenciam a posição das rodas. Por outro lado, em 3.3a é assumido a suposição de *Bekker*, tratando da lagarta como um objeto rígido onde, neste caso, o centro de gravidade estaria no meio, resultando assim numa distribuição uniforme. No caso das Fig. 3.3c e 3.3d a distribuição de pressões é trapezoidal devido ao centro de gravidade estar deslocado para os lados. Por ultimo, na Fig. 3.3e é encontra-se a distribuição de pressões de uma roda.

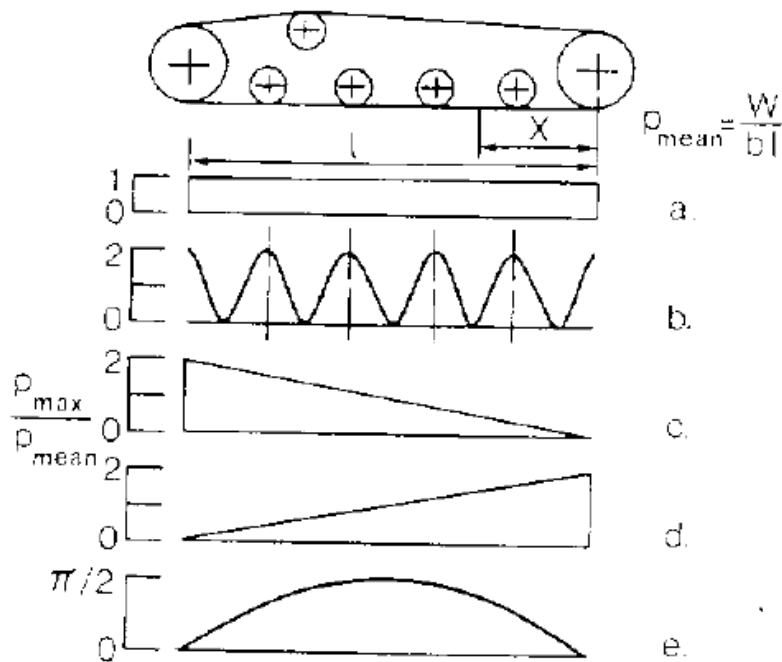


Fig. 3.3 - Várias distribuições de pressões normal sob uma lagarta, de acordo com Wills [10].

Apesar de a idealização de sistemas de lagartas como objetos rígidos, ser razoável para casos em que o rácio da distância entre rodas e o passo da lagarta seja baixo, para o caso oposto torna-se irreal pois a pressão no solo encontra-se concentrada debaixo das rodas da lagarta, apresentando uniformidade.

No caso do veículo projetado nesta dissertação, este é o modelo mais apropriado, considerando um rácio entre as rodas e o passo da lagarta baixo, para assumir assim, a lagarta como um objeto rígido. Assim é simplificada a interação mecânica entre a lagarta e o solo, sendo assim possível usar as equações mecânicas apresentadas em seguida.

3.3.3. Coesão e tensões de corte

Anteriormente foi dada uma introdução ao conceito de coesão do terreno. Mais detalhadamente, o conceito de coesão [3], consiste na ligação física entre partículas do solo. Esta ligação fortalece a conexão entre partículas independentemente da pressão sobre o solo. É diferente no caso das “massas de fricção”, onde as partículas podem ser mantidas juntas apenas com pressão exercida sobre elas. Assim, a resistência ao corte da neve “plástica” ou da argila, por exemplo, teoricamente não depende da pressão que lhe é sujeita, ao contrário do caso de areia seca, onde a resistência ao corte aumenta com a pressão aplicada.

Deste modo, a resistência ao corte de um tipo de solo não depende apenas na pressão normal, mas também do coeficiente de coesão c e do ângulo interno de fricção ϕ . A equação de Coulomb para a resistência ao corte de um solo é:

$$\tau = c + p \tan \phi, \quad (3.2)$$

onde τ é a resistência ao corte e p é tensão normal. No caso da areia seca, onde não existe coesão entre partículas, o valor c na equação é igual a zero. Por outro lado, na argila plástica, não existe fricção entre partículas, portanto ϕ é igual a zero, desaparecendo assim o termo da tangente na equação.

Na realidade, os valores de c e ϕ podem variar conforme a saturação do solo, devido à pressão hidrostática desenvolvida por pequenas bolsas de água. Assim estes valores devem ser apenas considerados como coeficientes empíricos, e não constantes do solo, tendo assim um significado físico restrito. Estes coeficientes apenas promovem uma melhor compreensão entre a relação do solo e da lagarta.

Na tabela seguinte encontram-se valores usados por *Wong e Preston-Thomas* [11], como parâmetros de referência para ajudar a computação do método de análise paramétrica em estudos de *performance* de veículos com rodas neste tipo de terrenos, onde K é o módulo de deformação do solo. Este módulo vai ser mencionado mais detalhadamente na próxima subsecção.

Tabela 2 - Parâmetros de resistência ao corte de solos [11].

Tipo de Terreno	Parâmetros internos		
	c (kPa)	ϕ (°)	K (cm)
Solo médio	8,62	22,5	2,54
Solo argiloso	7,58	14	2,54
Solo mole	3,71	25,6	2,1
Areia "Lete"	1,3	31,1	1,2
Neve "Petawawa"	0,4	24	-

3.3.4. Relação entre pressão e afundamento

O afundar de veículos de lagartas devido à deformação plástica ou elástica do solo é uma fonte de perda de potência e tração. Devido a este facto, esta subsecção entra em detalhe na relação entre a pressão de contacto da lagarta e a compactação do solo, no afundamento da lagarta e outros fatores contribuintes para o modelo.

Como já foi mencionado anteriormente, *Bekker* [9] assume que a lagarta pode ser representada por um plano retangular rígido. É indicado que a relação entre a pressão da lagarta e o afundar da mesma, em solo homogêneo, pode ser caracterizada como

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n, \quad (3.3)$$

onde p é a pressão de contacto da lagarta, b é a largura da lagarta, z a altura de afundamento, e n , k_c e k_ϕ são parâmetros de pressão-afundamento.

Na literatura de *Wong* [12], encontram-se medições experimentais dos parâmetros de pressão-afundamento para diferentes tipos de solo. Estes valores encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de pressão-afundamento fornecidas por *Wong* [12].

Tipo de Terreno	Parâmetros do terreno		
	n	k_c [kN/m ⁿ⁺¹]	k_ϕ [kN/m ⁿ⁺²]
Solo médio	0,8	29,76	2083
Solo argiloso	0,6	38,08	499,7
Solo mole	0,8	16,54	911,4

Uma equação alternativa é fornecida por *Reece* [13], baseada em componentes experimentais, onde os parâmetros de pressão-afundamento são adimensionais:

$$p = (ck'_c + \gamma_s bk'_\phi) \left(\frac{z}{b} \right)^n, \quad (3.4)$$

onde n , k'_c e k'_ϕ são parâmetros de pressão-afundamento, γ_s é a densidade aparente ou peso específico do solo e c a coesão do terreno. Colocando z em evidência, de modo a facilitar o cálculo do afundamento da lagarta, vem:

$$z = \left(\frac{pb^n}{(ck_c + \gamma_s bk_\phi)} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (3.5)$$

sendo,

$$p = \frac{m \times g}{b \times l}, \quad (3.6)$$

onde m é a massa combinada do veículo e passageiro, g a aceleração da gravidade e l é o comprimento da lagarta.

Devido ao facto de os parâmetros serem adimensionais, a equação 3.4 é favorável em relação à equação 3.3. A equação de *Reece* é também consistente com as abordagens teóricas de cálculo da capacidade de sustentação do solo [3].

3.3.5. Forças de resistência externas

Quando um veículo de lagartas desenvolve uma força de tração em terrenos deformáveis, surgem forças de resistência ao movimento, devido à deformação plástica do solo. De modo a que o veículo se consiga deslocar, é necessário que desenvolva um esforço de tração superior à força resistente. Esta resistência externa ao movimento deve-se a 3 tipos de deformações:

- Deformação plástica do solo;
- “*Bulldozing*”;
- Arrastamento do solo.

Segundo *Le* e *Bekker* [4] e [9], a deformação plástica do solo ou a compactação do solo resulta numa força resistente ao movimento longitudinal chamada resistência da compactação (R_c). Esta força pode ser calculada através da seguinte equação:

$$R_c = bk \frac{z^{n+1}}{n+1} , \quad (3.7)$$

onde k é o fator de pressão-afundamento do solo, calculado através da seguinte fórmula:

$$k = \frac{k'_c}{b} + k'_\phi \quad (3.8)$$

Nas equações anteriores, b é a largura da lagarta, z o afundamento da lagarta e n , k'_c e k'_ϕ são os parâmetros de pressão-afundamento.

Em segundo lugar, encontra-se a resistência devida ao “*bulldozing*”, que é a resistência ao movimento devida ao arrastamento de neve na parte frontal da lagarta, que é diretamente relacionada com o afundamento da lagarta. Esta resistência calcula-se da seguinte forma:

$$R_b = \frac{b \sin(\alpha + \phi)}{\sin \alpha \cos \phi} (2zck'_c + \gamma_s z^2 k'_\phi) , \quad (3.9)$$

onde α é o ângulo entre a parte horizontal da lagarta e a parte inclinada da frente da lagarta.

A terceira e última contribuição para a resistência ao movimento deve-se ao arrastamento do solo que penetra lateralmente o interior da lagarta. Esta resistência é calculada por:

$$R_l = K_r z l c \quad , \quad (3.10)$$

sendo K_r um valor que varia de 2 a 4, dependendo da largura da barriga do veículo. A força total, que impõe o movimento da lagarta em solos deformáveis, é igual à soma de todas as resistências mencionadas anteriormente.

3.3.6. Esforço de tração

O esforço de tração, ou “*Drawbar Pull*”, é a tração fornecida pela lagarta. Este valor calcula-se através da seguinte equação:

$$F = (Ac + W \tan \phi) \left[1 - \frac{K_s}{il} \left(1 - e^{\frac{-il}{K_s}} \right) \right] \quad (3.11)$$

onde A é a área de contacto com o solo, W é a força do peso do veículo, i é o escorregamento e K_s é o módulo de deformação de corte que é um valor entre 2,5 e 5 para neve fresca [14].

Resumidamente, este é o esforço máximo que a lagarta pode transferir para o solo. Assim, para que o veículo se possa deslocar, é necessário que a soma total das resistências externas ao movimento seja inferior ao valor da tração transferida pela lagarta para o solo. Se o contrário ocorrer, existe 100% de escorregamento, impossibilitando o movimento do veículo.

Capítulo 4

4. Dimensionamentos e seleções

Para um projeto de um veículo deste género, é necessário o dimensionamento de componentes mecânicos e elétricos de forma a desenvolver um produto capaz e eficaz, com vista à sua funcionalidade. Deste modo, no capítulo decorrente, fazem-se não só os dimensionamentos, como também a seleção dos principais componentes, sendo estes: a lagarta, o motor, a redução e a bateria elétrica.

4.1. Dimensionamento da Lagarta

Na secção decorrente, encontram-se os cálculos efetuados de modo a otimizar o meio de tração do veículo desenvolvido nesta dissertação. Com este objetivo, teve-se como base a teoria demonstrada no capítulo anterior, combinando o conhecimento desenvolvido por Bekker, Reece e Wong.

Na etapa inicial do desenvolvimento da lagarta, foi utilizado como base os conhecimentos fornecidos por Bekker [15], mas ao analisar os cálculos, verificou-se que este modelo não seria o mais indicado. Foi assim decidido, combinar o conhecimento experimental fornecido por Reece e Wong, sendo este, o conjunto de equações mencionadas na secção anterior.

Na tabela seguinte encontram-se os valores considerados dos parâmetros pressão-afundamento, para o tipo de solo em estudo: a neve. Estes valores foram retirados da Tabela 3 e da documentação de Wong [12].

Tabela 4 - Parâmetros de pressão-afundamento e de resistência ao corte da neve, fornecidas por Wong [12].

Parâmetros de pressão-afundamento		Valores de Wong	Unidades
Expoente de deformação da neve	$n =$	0,8	-
Módulo coesivo de deformação da neve	$k'_c =$	16,54	[kN/m ⁽ⁿ⁺¹⁾]
Módulo de fricção da deformação da neve	$k'_\phi =$	911,4	[kN/m ⁽ⁿ⁺²⁾]
Densidade da neve	$\gamma_s =$	0,5	[g/m ³]
Parâmetros de resistência ao corte			
Coeficiente de coesão	$c =$	400	[Pa]
Ângulo interno de fricção	$\phi =$	24	[°]

Estes parâmetros possuem valores obtidos experimentalmente por *Wong*, sendo medidos em neve mole ou fresca, pois este tipo de solo (dentro dos diferentes tipos de neve), é onde o deslocamento é mais difícil. Deve-se ao facto de, em casos onde a neve é menos recente, que equivale a uma maior dureza, o afundamento ser inferior, resultando em menores resistências externas da neve sobre a lagarta. Foi assim decidido que os valores usados no projeto da lagarta do veículo desta dissertação, seriam valores de parâmetros para o tipo de neve mole ou fresca.

Foram ainda assumidos os valores mencionados na Tabela 5, de forma a possibilitar a realização dos cálculos. Os factos que influenciaram a escolha destes valores foram, no caso do valor K_r , o facto de o veículo não possuir barriga, e no caso do escorregamento i , o facto de 20% ser um valor razoável.

Tabela 5 - Valores assumidos para o dimensionamento da lagarta.

Fatores	Valor	Unidades	Comentário
α	150	[°]	Ângulo entre a zona horizontal e a zona frontal inclinada da lagarta
K_s	0,035	[m]	Módulo de deformação de corte da neve. Segundo <i>Wong</i> este valor varia entre 2.5 e 5 [cm] para o caso de neve fresca
K_r	2	-	Valor que varia entre 2 e 4, dependente da largura da barriga do veículo
i	0,2	-	Escorregamento da lagarta

A aplicação das fórmulas referidas na subsecção 3.3, foi feita através do uso de um documento *Excel* de modo a facilitar, não só a aplicação, como a visualização dos resultados obtidos. É necessário mencionar ainda que para existir um dimensionamento fisicamente possível e adequado, isto é, a soma das forças de resistências externas serem inferiores à força de tração fornecida pela lagarta, foi necessário alterar os valores da Tabela 6, até encontrar os valores corretos. É de apontar ainda que foram usados valores de casos existentes (por exemplo, motos de neve), de modo a provar o funcionamento das equações.

Na tabela seguinte encontram-se, então, as incógnitas principais das equações, isto é, as tais dimensões da lagarta, que se foram alterando até encontrar os devidos resultados.

Tabela 6 - Valores inseridos no sistema, de modo a calcular as forças de resistência externa.

Número de Lagartas	Peso combinado (veículo e passageiro) [Kg]	Largura da lagarta, b [m]	Comprimento da lagarta, l [m]
1	120	0,118	1,000

De seguida apresentam-se os valores obtidos ao usar as equações reportadas na subsecção 3.3. Demonstram-se desde os valores da pressão de contacto, das resistências da neve na lagarta e até a força de tração fornecida pela lagarta. Como foi dito anteriormente, estes valores foram geridos através da inserção dos valores da Tabela 6, de modo a encontrar um conjunto de valores fisicamente possíveis e adequados ao projeto de uma lagarta para um veículo de transporte em terrenos com neve. Assim, a Tabela 7, apresenta os resultados obtidos através da inserção dos valores da Tabela 6.

Tabela 7 - Resultados obtidos ao utilizar os valores das tabelas anteriores nas equações da subsecção 3.3.

Resultados ²							
p [Pa] ³	z [m]	k	R_c [N]	R_b [N]	R_l [N]	F [N]	R_{total} [N]
3698	0,057	1,052E+06	398	20,4	45,6	471	464

Ao analisar os valores obtidos, verificamos que a força de tração fornecida por esta lagarta F , é superior à resistência externa aplicada ao movimento pela neve no caso desta lagarta R_{total} . Podemos ainda verificar que a resistência externa mais elevada é a resistência de compactação, indo assim de encontro à teoria de *Bekker* [15].

Desta forma, esta lagarta é uma possível solução para o veículo se poder movimentar no tipo de solo em questão, tendo assim como dimensões finais, uma largura de 0,118 [m] e de comprimento 1 [m].

² Estes valores são aproximados, usando apenas 3 algarismos significativos.

³ Para o cálculo da pressão de contacto, foi adicionada a área de contacto dos skis usados.

4.2. Dimensionamento do motor

4.2.1. Dimensionamento

Apesar de um motor elétrico ser um componente eletromecânico, o dimensionamento trata-se primeiramente de um processo mecânico.

Para assegurar que o veículo se movimenta no tipo de neve assumido, este terá que possuir um motor elétrico com potência suficiente para vencer a resistência total da neve sobre a lagarta. Assim, procedeu-se à realização de diagrama de forças estáticas sobre o veículo em desenvolvimento.

Em primeiro lugar, na Fig. 4.1, temos o estudo das forças num plano inclinado, para analisar a força que o veículo necessita para sobrepor a força das resistências estudadas na subseção anterior.

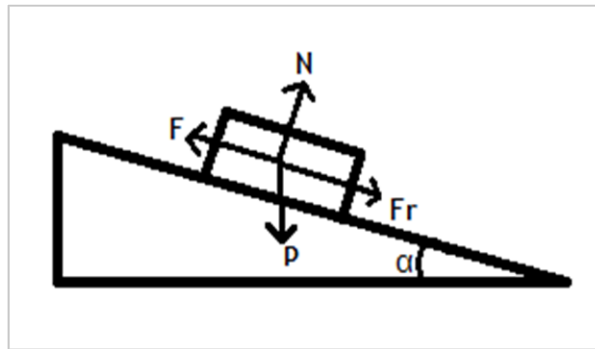


Fig. 4.1 - Diagrama de forças estáticas atuantes no veículo num plano inclinado.

Nesta figura, N é a força normal, P a força do peso combinado do veículo e do passageiro, F a força necessária para o veículo se deslocar, F_r a força da resistência da neve e α o ângulo do plano inclinado.

As equações que decompõem mecanicamente o sistema da Fig. 4.1 são:

$$F = F_r + P \sin \alpha , \quad (4.1)$$

$$N = P \cos \alpha , \quad (4.2)$$

sendo,

$$P = m \times g , \quad (4.3)$$

onde m é a massa combinada do veículo e passageiro, e g é a aceleração da gravidade (9.81).

Para o caso em que o veículo se desloca num plano horizontal, o diagrama de forças é representado pela Fig. 4.2.

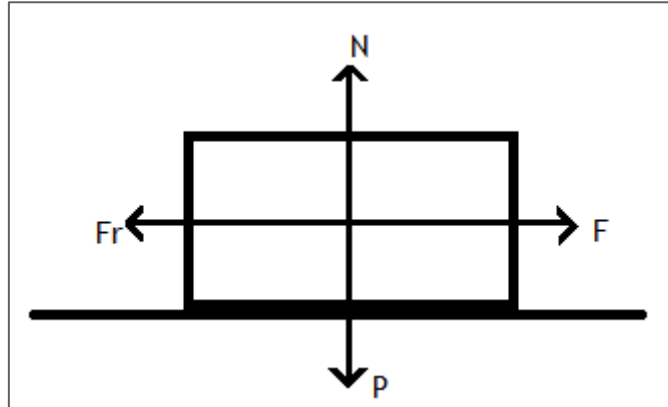


Fig. 4.2 - Diagrama de forças estáticas atuantes no veículo num plano horizontal.

No caso deste diagrama, as equações mecânicas que governam são:

$$F = F_r , \quad (4.4)$$

$$N = P , \quad (4.5)$$

onde P é igual à equação 4.3.

Seguidamente, vai ser calculado o binário, na roda do veículo, necessário para sobrepor a força do solo em ambos os planos, segundo a equação:

$$M_r = F \times \frac{d_r}{2} , \quad (4.6)$$

sendo F a força calculada usando a equação 4.1 e a equação 4.4, dependendo do plano, e d_r é o diâmetro da roda motriz da lagarta.

Para o cálculo da velocidade angular da roda motriz usa-se a equação:

$$\omega_r = \frac{V}{\frac{d_r}{2}} , \quad (4.7)$$

onde V é a velocidade a que o veículo se vai deslocar. Para este valor ter as unidades de rotações por minuto, multiplica-se o resultado por $\frac{60}{2\pi}$.

Por fim, para calcular a potência necessária na roda, basta multiplicar a velocidade angular, pelo binário, vindo:

$$P_r = w_r \times M_r, \quad (4.8)$$

Desta forma, procedeu-se ao cálculo das equações num documento *Excel*, onde os valores da Tabela 8 são os valores inseridos nas equações, e os valores da Tabela 9 são os resultados necessários ao dimensionamento do motor elétrico.

Tabela 8 - Valores inseridos nas equações anteriores.

Diagramas	Valores				
	F_r [N]	m [kg]	α [°]	V [km/h]	d_r [m]
Plano inclinado	464	120	20	10	0,14
Plano horizontal	464	120	-	15	0,14

Tabela 9 - Resultados obtidos resolver as equações anteriores.

Diagramas	Resultados			
	F [N]	M_r [Nm]	w_r [RPM]	P_r [kW]
Plano inclinado	867	60,7	379	2,41
Plano horizontal	464	32,5	568	1,93

Ao analisar a Tabela 9, podemos verificar que o maior binário requerido é, como esperado, no caso do plano inclinado, tendo um valor de 60,7 [Nm], a 379 [RPM].

A Tabela 10 resulta do multiplicar estes valores por um fator de segurança de 1,2, de modo a existir margem de manobra, vem 72,8 [Nm] de binário na roda, a 455 [RPM], o que se traduz numa potência na roda de 2,9 [kW]. Assim, o motor elétrico escolhido terá que fornecer a potência de 2,9 [kW] na roda, para o veículo se poder deslocar.

Tabela 10 - Resultados obtidos com o fator de segurança.

Diagramas	Resultados				
	Fator segurança	F [kN]	M_r [Nm]	w_r [RPM]	P_r [kW]
Plano inclinado	1,2	1,040	72,8	455	2,89
Plano horizontal	1,2	557	39,0	682	2,32

4.2.2. Seleção do motor

Encontrados os fatores mecânicos impostos, surge a seleção do motor adequado para o sistema. Numa fase seguinte, realizou-se um estudo sobre as vantagens e desvantagens de diferentes tipos de motores elétricos, onde se destacaram os motores *DC*, com e sem escovas. Estes dois tipos sobressaíram sobre os motores de indução devido, não só por serem alimentados por corrente contínua, como por serem o tipo de motores mais usados em aplicações deste tipo, devido à relação peso-potência, às características de velocidade e binário, à corrente de arranque, o preço, entre outros.

Na Tabela 11, encontra-se uma comparação entre os motores *DC* sem escovas ou *BLDC* (*brushless DC*), e os motores *DC* com escovas, segundo Yedamale [16].

Tabela 11 - Comparação entre motores BLDC e motores DC com escovas [16].

Características	Motor BLDC	Motor DC com escovas
Comutação	Comutação eletrônica baseada em sensores de posição.	Comutação com as escovas.
Manutenção	Reduzida devido à inexistência de escovas.	Necessita manutenção periódica
Características de binário / velocidade	Plana - Dispõe o binário nominal a todas as velocidades	Semi-plana - A velocidades mais altas, a fricção das escovas aumenta, resultando numa redução do binário útil.
Eficiência	Alta - Não existe decadência de voltagem nas escovas	Moderada
Potência de saída / tamanho	Alta - Tamanho reduzido devido a altas características térmicas.	Moderada / baixa - O calor produzido pela armação é dissipado no espaço de ar, aumentando assim a temperatura deste.
Inércia do rotor	Baixa - Pois possui imanes permanentes no rotor, aumentando a resposta dinâmica.	Inércia do rotor elevada, o que limita as características dinâmicas
Intervalo de velocidades	Alto - Não existe limitação mecânica devido à comutação pelas escovas.	Inferior - Devido à limitação mecânica das escovas
Geração de ruído elétrico	Baixo	Arcos nas escovas geram ruído
Custo de produção	Maior - Devido à existência de imanes permanentes	Baixo
Controlo	Complexo e caro	Simples e barato
Requerimentos de controlo	É sempre necessário um controlador para manter o motor em movimento. O mesmo controlador pode variar a velocidade.	Não é necessário um controlador para velocidade constante. Só para casos em que a velocidade varia.

Podemos concluir, de um modo geral, que o motor *BLDC* é superior em todos os aspetos, exceto no fator do custo. O facto de o motor possuir uma boa característica de binário / velocidade e de potência/tamanho, no caso do veículo em desenvolvimento nesta dissertação, é mais importante do que o fator de custo de produção. Assim, o tipo de motor utilizado no veículo é um motor *BLDC*.

A Fig. 4.3 demonstra a composição de um motor *BLDC*, onde se pode verificar a existência de três conjuntos de espiras, em pontos opostos, com o intuito de, ao serem excitadas alternadamente, formarem um campo magnético que força o movimento dos ímanes presentes no rotor do motor. Devido ao facto de as espiras terem de ser excitadas alternadamente, é requerido um circuito de controlo para este tipo de motor. Numa seção mais avançada irá ser analisado mais em detalhe o controlo requerido por este tipo de motores.

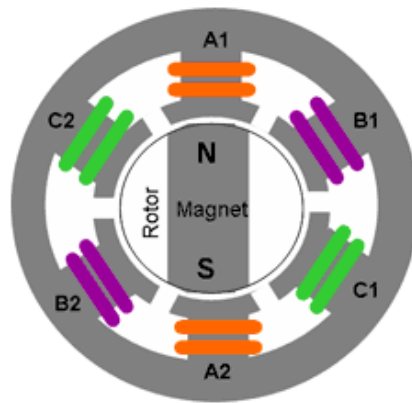


Fig. 4.3 - Constituintes do tipo de motor *BLDC* ou motor DC sem escovas [23].

Existem ainda dois tipos de motores BLDC, os “*inrunners*” e os “*outrunners*”, sendo estes diferenciados pela parte móvel do motor, isto é, no caso dos “*inrunners*” a parte móvel é a interior, ou seja, o rotor (onde estão localizados os ímanes permanentes) que se encontra no interior da carcaça do motor. No caso dos motores “*outrunners*” a parte móvel encontra-se no exterior, ou seja, o rotor e a carcaça do motor são um só. Uma vantagem do motor “*outrunner*” sobre o “*inrunner*” é a questão de a parte móvel se encontrar afastada do centro, existindo assim um maior efeito de alavanca, o que proporciona um maior binário. Para este veículo, foi então escolhido um motor *BLDC* “*outrunner*” devido a este possuir um binário superior ao “*inrunner*”.

Decidido o tipo de motor e com os valores dos fatores mecânicos, procedeu-se à pesquisa no mercado, do motor com melhor capacidade para satisfazer as necessidades do projeto. Ao analisar uma longa lista, comparando preços, características mecânicas, materiais de construção e mesmo *reviews* de compradores, decidiu-se usar o motor com as características demonstradas na Tabela 12 [21].

Tabela 12 - Características do motor escolhido [21].

Características	RV-120-Sh
Potência continua	2,5 [kW]
Potência pico	6 [kW]
Voltagem	24 [V] a 96 [V]
Binário	12,2 [Nm] a 2150 [RPM] a 60 [A]
Peso	2,7 [kg]
Preço	285 [\$]

Este é um motor (Fig. 4.4), comercializado pela empresa *REVOLT*, e denomina-se por *RV-120-Sh*. Possui sensores de posição do rotor e de temperatura, é construído com bons materiais, e é resistente a poeiras e salpicos. Possui ainda uma eficiência razoável de 89% e é considerado pelos compradores, um bom e confiável motor, a um razoável preço.

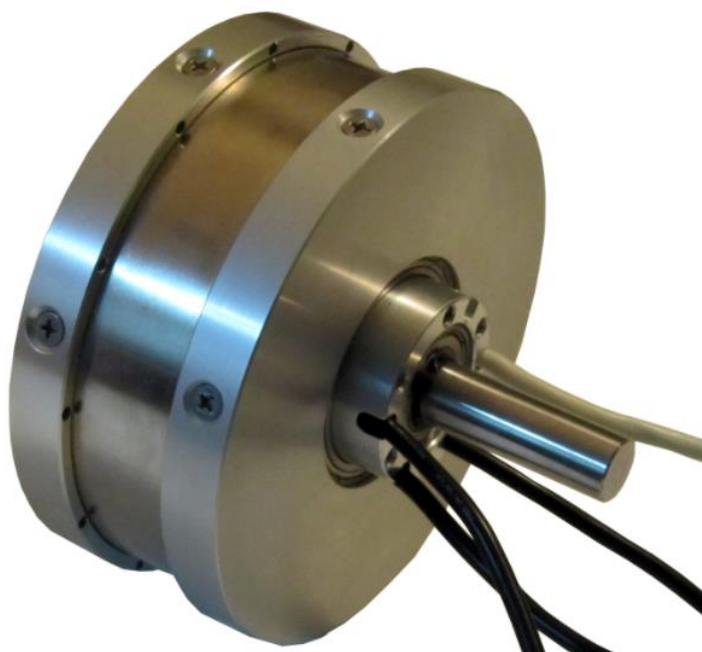


Fig. 4.4 - Motor escolhido para o veículo em desenvolvimento.

4.3. Dimensionamento da redução

De modo a garantir que o binário do motor é suficiente, é necessário aplicar uma redução de velocidades, pois a velocidade de rotação do motor é alta para a aplicação. Deste modo, é necessário dimensionar um sistema de redução de velocidade, aumentando assim o binário.

$$r = \frac{w_M}{w_r} = \frac{M_r}{M_M} = \frac{72,8}{12,2} = 5,97 \cong 6 , \quad (4.9)$$

onde r é o fator de redução necessária, w_M a velocidade de rotação do motor, w_r a velocidade de rotação da roda, M_r o valor do binário solicitado pela roda motriz, da Tabela 10, e M_M o binário fornecido pelo motor. A redução foi realizada através dos valores do binário devido a este fator ser mais importante do que a velocidade do veículo, no caso deste produto.

Multiplicando o binário do motor M_M pelo fator de redução r , vem:

$$M_{Mr} = M_M \times r = 12,2 \times 6 = 73,2 \text{ [Nm]} , \quad (4.10)$$

onde M_{Mr} é o binário fornecido à roda motriz pelo motor, ou o binário depois da redução. Comparando o binário que a roda motriz requeria, $M_r = 72,8 \text{ [Nm]}$, e o valor do resultado da equação 4.10, $M_{Mr} = 73,2 \text{ [Nm]}$, podemos concluir que este motor é capaz de fornecer o binário necessário para que o veículo se movimente no tipo de neve estudado.

O próximo passo é o desenvolvimento mecânico do sistema de transmissão/redução de velocidade com intuito de fornecer uma redução de fator 6. Existem várias possibilidades para a realização de uma redução, variando desde transmissão por correias ou correntes, até reduções planetárias ou engrenagens. No projeto deste veículo o modo de transmissão/redução selecionado foi o de correias, devido não só a problemas de espaço e peso, como a manutenção requerida (não necessita lubrificação).

Entre os diferentes tipos de correias, foi ainda decidido usar correias dentadas sincronas, devido à maior eficiência tanto em termos de velocidade como de binário, e ainda à inexistência de escorregamento devido à existência de dentes.

Visto a redução ter um fator de 6, foi decidido dividir a redução em dois estágios como é demonstrado na Fig. 4.5, tratando-se de primeiramente uma redução de fator 3, e posteriormente uma redução de fator 2, resultando assim numa redução de fator 6 entre o motor e a roda motriz.

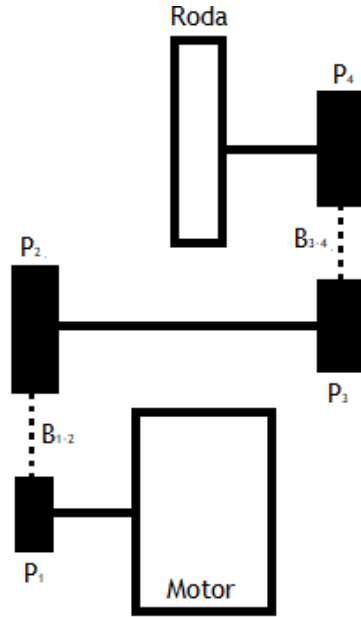


Fig. 4.5 - Diagrama do sistema de transmissão/redução, através de correias e polias, usada no veículo em desenvolvimento.

Na figura anterior, P_1 , P_2 , P_3 e P_4 são as polias, e B_{1-2} e B_{3-4} as respectivas correias. A ligação mecânica entre o motor e a polia P_1 é realizada através de um veio, bem como entre a polia P_2 e P_3 .

De modo a existir uma redução de 3 entre P_1 e P_2 , e uma redução de 2 entre P_3 e P_4 , vem:

$$3n_{P_1} = n_{P_2} , \quad (4.11)$$

$$2n_{P_3} = n_{P_4} , \quad (4.12)$$

onde n é o número de dentes da respetiva polia. Deste modo, os valores escolhidos para o número de dentes das polias, são $n_{P_1} = 16$, $n_{P_2} = 48$, $n_{P_3} = 18$ e $n_{P_4} = 36$.

Para o dimensionamento das correias, foi consultado um catálogo de um fabricante [17], de modo a encontrar as correias adequadas para este projeto. No caso das polias, a informação foi recolhida de [18], onde não só se encontra um catálogo de polias, como no próprio *website*, está um calculador que fornece as distâncias entre polias, de acordo com as suas dimensões (número de dentes e passo) e das correias escolhidas.

Foi ainda necessário separar e obter o valor das forças intermédias, ao transmitir o binário do motor até à roda motriz. Assim:

$$M_M = M_{P_1} , \quad (4.13)$$

$$3M_{P_1} = M_{P_2} , \quad (4.14)$$

$$M_{P_2} = M_{P_3} , \quad (4.15)$$

$$2M_{P_3} = M_{P_4} , \quad (4.16)$$

O binário do motor usado para estes cálculos é o binário de arranque, pois segundo [17], é 2,5 vezes superior ao binário de funcionamento. Logo:

$$M_{M_{arr}} = 2,5 M_M , \quad (4.13)$$

onde M_M é o binário do motor, M_p é o momento em cada polia e $M_{M_{arr}}$ o binário de arranque do motor. Para o cálculo da força aplicada na polia (no arranque), usou-se a seguinte equação:

$$F_{P_{arr}} = \frac{M_{P_{arr}}}{\frac{d_p}{2}} , \quad (4.14)$$

onde $F_{P_{arr}}$ é a força ou tensão aplicada, durante o arranque, numa polia, $M_{P_{arr}}$ é o momento aplicado em cada polia no arranque, e d_p é o diâmetro da polia em questão.

A Tabela 13, surge assim, ao conciliar toda a informação acima mencionada, pois todos os componentes do dimensionamento dependem uns dos outros, sendo este o método usado de forma a simplificar a escolha tanto das polias como das correias.

Tabela 13 - Valores combinados das polias e das correias [17] e [18].

Fatores	Correia B_{1-2}		Correia B_{3-4}	
	<i>Brecoflex AT5</i>		<i>Brecoflex AT10</i>	
	P_1	P_2	P_3	P_4
Passo [mm]	5		10	
Largura da correia [mm]	25		25	
Número de dentes da polia n	16	48	18	36
Diâmetro [mm]	25,5	76,4	57,3	114,6
Comprimento total da correia [mm]	500		810	
Distâncias entre centros de polias [mm]	168,1		268,5	
Binário de funcionamento [Nm]	12,2	36,6	36,6	73,2
Binário de arranque [Nm]	30,5	91,5	91,5	183
Tensão aplicada no arranque [N]	2392	2395	3194	3194
Tensão admissível pela correia [kN]	2544		3500	

Ao analisar a tabela anterior, verificamos que as correias escolhidas para as duas reduções, estão bem dimensionadas, isto é, a tensão admissível é superior à tensão aplicada durante o arranque do veículo. Assim, as correias escolhidas são, a *Brecoflex AT5* e a *Brecoflex AT10* ambas com uma largura de 25 [mm]. Em termos de polias, são as respectivas a cada correia, com o número de dentes mencionados anteriormente.

4.4. Dimensionamento da bateria e do circuito de proteção

4.4.1. Dimensionamento e seleção da bateria

Escolhido o motor elétrico, é necessário possuir uma fonte de energia elétrica para poder alimentar o motor em questão. Assim, é necessário o devido dimensionamento da bateria elétrica.

Existem vários tipos de baterias, diferenciando-se principalmente pela sua composição química. Variam desde as mais conhecidas, baterias de chumbo-ácido, às baterias de lítio, entre outras. Na Fig. 4.6 encontra-se uma comparação entre os diferentes tipos de química das baterias, fornecendo alguns valores para as suas características principais.

	NiCd	NiMH	Lead Acid	Li-ion	Li-ion polymer	Reusable Alkaline
Gravimetric Energy Density (Wh/kg)	45-80	60-120	30-50	110-160	100-130	80 (initial)
Internal Resistance (includes peripheral circuits in mW)	100 to 200 ¹ 6V pack	200 to 300 ¹ 6V pack	<100 ¹ 12V pack	150 to 250 ¹ 7.2V pack	200 to 300 ¹ 7.2V pack	200 to 2000 ¹ 6V pack
Cycle Life (to 80% of initial capacity)	1500 ²	300 to 500 ^{2,3}	200 to 300 ²	to 500 to 1000 ³	300 to 500	to 50 ³ (to 50%)
Fast Charge Time	1h typical	2-4h	8-16h	2-4h	2-4h	2-3h
Overcharge Tolerance	moderate	low	high	very low	low	moderate
Cell Voltage (nominal)	1.25V ⁶	1.25V ⁶	2V	3.6V	3.6V	1.5V
Load Current - peak - best result	20C 1C	5C 0.5C or lower	5C ⁷ 0.2C	>2C 1C or lower	>2C 1C or lower	0.5C 0.2C or lower
Operating Temperature (discharge only)	-40 to 60°C	to -20 to 60°C	to -20 to 60°C	to -20 to 60°C	to 0 to 60°C	to 0 to 65°C
Commercial use since	1950	1990	1970	1991	1999	1992

Fig. 4.6 - Comparação entre os diferentes tipos de baterias, variando quimicamente [19].

A razão de usar baterias de lítio, foi devido à relação entre a capacidade energética e o tamanho ou peso, e às características elétricas. Dentro das baterias de lítio, existe ainda, uma vasta gama de possibilidades, variando uma vez mais pela composição química, mas visto ser uma área em constante desenvolvimento, e todos os anos aparecerem novos estudos com baterias de diferentes componentes químicos, é difícil diferenciá-los detalhadamente nesta dissertação.

Visto isto, apenas foi comparado o uso de baterias de *Li-ion* ou *Li-Po*. As baterias de *Li-Po* apesar de possuírem um tamanho inferior e, conseqüentemente, possuírem uma capacidade energética inferior, possuem uma grande capacidade de descarga energética (denominado por um valor de *C-rating*). Este tipo de bateria é mais usual em veículos telecomandados, como por exemplo *drones*, ou até portáteis, telemóveis e câmaras fotográficas, onde o peso e o *C-rating* são importantes. Por outro lado, as baterias *Li-ion* oferecem uma boa relação entre capacidade energética e tamanho/peso, e uma capacidade de descarga aceitável, sendo estas as mais usadas em aplicações de carros elétricos, bicicletas elétricas, entre outros. Assim foi decidido usar baterias com células cilíndricas de *Li-ion*, de modo a proporcionar potência e autonomia suficiente para o veículo em desenvolvimento, ocupando o menor espaço possível.

Para se dimensionar a bateria, é necessário saber a potência requisitada pelo motor. Assim, os valores usados para o dimensionamento da bateria começam por ser os 48 [V] e os 60 [A] requeridos pelo motor num plano inclinado, e é delineada ainda uma autonomia de 20 minutos devido à limitação de peso do veículo.

Ao analisar o mercado à procura das melhores células constituintes da bateria, encontrou-se a mencionada na Tabela 14, sendo esta a célula com as características ideais para o sistema em desenvolvimento.

Tabela 14 - Características da célula de bateria escolhida para o dimensionamento [20].

Características	Panasonic NCR18650PF
Tensão nominal [V]	3,6
Capacidade nominal [mAh] a 25°C	2900
Corrente de descarga máxima contínua [A]	10
Peso máximo [g]	48
Temperatura	Carga: 0 a 45°C
	Descarga: -20 a 60°C
	Armazenagem: -20 a 50°C
Densidade energética [Wh/kg]	207
Preço por célula [€]	2,64

Possuindo a célula da bateria base, procedeu-se ao dimensionamento da bateria, para determinar quantas células em série e em paralelo seriam necessárias para fornecer a energia requerida pelo motor elétrico, pois duas células em série aumentam para o dobro a tensão nominal do conjunto, e duas células em paralelo, aumentam para o dobro a capacidade nominal.

$$n_{CS} = \frac{U_M}{U_{NC}} = \frac{48}{3,6} = 13,33 \approx 14 , \quad (4.15)$$

onde n_{CS} é o número de células em série, U_M é a tensão nominal do motor, e U_{NC} é a tensão nominal da célula. Assim verificamos que o número de células em série tem que ser de 14, designando-se assim por uma bateria 14S. Recalculando o valor da tensão nominal do conjunto U_{NB} , vem:

$$U_{NB} = n_{CS} \times U_{NC} = 14 \times 3,6 = 50,4 [V] , \quad (4.16)$$

Visto a célula ter uma capacidade nominal de 2,9 [Ah], para se calcular a autonomia usa-se a seguinte equação:

$$t = \frac{Q_c}{I_M} = \frac{2,9}{60} = 0,048 [h] = 2,9 [min] , \quad (4.17)$$

sendo t é o tempo de autonomia da bateria, Q_c é a capacidade nominal da célula, e I_M é a tensão requerida pelo motor. De modo a aumentar a autonomia do veículo para 20 minutos, é necessário dividir os 2,9 [min] por 20 [min] para saber quantas células serão necessárias em paralelo para fornecer essa energia.

$$n_{CP} = \frac{Q_c}{t_r} = \frac{2,9}{20} = 6,89 \approx 7 , \quad (4.18)$$

onde n_{CP} é o número de células em paralelo, e t_r a autonomia requisitada.

Assim, o módulo de baterias necessita possuir 14 células em série, juntamente com 7 conjuntos de 14 células em paralelo. Foi encontrado na teoria, que para manter as células equilibradas, é necessário existir um número par de células tanto em série como em paralelo. Assim, a composição final do módulo de células de bateria é de 14 células em série e 8 em paralelo. Esta configuração denomina-se por 14S8P. O número de células no módulo é calculado multiplicando 14 por 8, o que dá um total de 112 células individuais.

A capacidade energética Q_B deste módulo de baterias é assim de:

$$Q_B = Q_c \times n_{CP} = 2,9 \times 8 = 23,2 [Ah] \quad (4.19)$$

Usando a equação 4.17, para o cálculo da autonomia do módulo completo, vem:

$$t = \frac{Q_B}{I_M} = \frac{23,2}{60} = 0,387 [h] = 23,2 [min] ,$$

ficando assim o veículo, com uma autonomia de 23,2 minutos. É de notar que esta autonomia foi calculada para a potência necessária para que o veículo suba uma inclinação de 20% com grandes quantidades de neve recente. O veículo não se irá deslocar sempre em terrenos que necessitam tanta potência.

Para saber se o conjunto de células suportam uma descarga contínua de corrente de 60 [A], que é a solicitada pelo motor elétrico, recorre-se à equação:

$$C_B = \frac{I_M}{Q_B} = \frac{60}{23,2} = 2,59 , \quad (4.20)$$

onde C_B é o valor de *C-rating* da bateria. Para o caso da célula individual, o valor de *C-rating*, usando os dados fornecidos pelo fabricante, é calculado pela equação 4.20, assim:

$$C_C = \frac{I_C}{Q_C} = \frac{10}{2,9} = 3,45 ,$$

sendo C_C o valor de *C-rating* da célula individual, e I_C o valor da corrente de descarga máxima contínua fornecida pelo fabricante. Verifica-se que o valor de *C-rating* da bateria é inferior ao da célula individual, indicando assim que a bateria suporta a descarga de corrente solicitada pelo motor elétrico.

Assim, podemos concluir que um módulo de células Panasonic NCR18650PF, com a configuração de 14S8P é capaz de fornecer a potência necessária ao motor elétrico escolhido, bem como, com uma autonomia de 23 minutos.

4.4.2. Seleção do circuito de proteção da bateria

Uma das desvantagens no uso do tipo de baterias *Li-ion* mencionadas na subsecção anterior, é a necessidade de uso de circuitos de proteção, que monitorizam a carga e a descarga das células, devido ao perigo intrínseco no uso deste tipo de baterias, pois se forem sobrecarregadas ou descarregadas abaixo de certos limites, existe a potencialidade de danificar as células reduzindo a sua eficiência e, em casos extremos, a ocorrência de explosão. Este fenómeno pode ainda ocorrer se não existir o devido manuseamento da bateria, mantendo num sítio seguro em relação a impactos ou perfurações.

Este circuito de proteção, denominado por *BMS (Battery Managment System)*, também se certifica que a carga e descarga é efetuada de forma balanceada entre todas as células, monitorizando cada conjunto de células em série.

Os principais valores que influenciam a seleção do circuito BMS são, a corrente de descarga contínua e máxima, as correntes de carga, e ainda, as tensões máximas e mínimas para as células das baterias. Assim, usando os valores obtidos nas secções anteriores, procedeu-se à pesquisa de fornecedores de circuitos deste tipo, conforme as características requeridas.



Fig. 4.7 - Circuito *BMS* ou circuito de proteção escolhido (*HGX-D338* da *besttechpower*), para proteger a bateria [22].

Na Tabela 15, encontram-se as características principais fornecidas pelo fabricante de maneira a verificar a correta seleção do tipo de circuito de proteção. Trata-se de um circuito para baterias 14S, onde a corrente de descarga máxima é de 80 [A], sendo este o máximo de corrente de descarga permitido pelo fabricante das células da bateria ($10 \text{ [A]} \times 8$), onde 8 é o número de células em série. Em relação às tensões máximas de carregamento, e mínimas de descarregamento, são programáveis através do *software* fornecido pelo fabricante. As restantes características encontram-se no respetivo *Datasheet*.

Tabela 15 - Características principais do circuito *BMS* escolhida para a bateria [22].

<i>BMS (HCX-D338)</i>	
Características Principais	Valor
Modelo	14S
Voltagem de carga	58,8 [V]
Corrente de descarga máxima	80 [A]
Sobre carregamento de tensão	Programável
Tensão mínima de descarga	Programável

4.5. Seleção do circuito de controlo do motor

4.5.1. Introdução ao controlo de motores BLDC

Os motores *BLDC*, isto é, motores *DC* sem escovas, necessitam um circuito de controlo de velocidade, como já tinha sido referido na subseção do motor. O controlo tem como intuito a excitação alternada rigorosamente das fases do estator do motor, de forma a movimentar o rotor linearmente, através da força de atração entre o campo magnético gerado e o campo magnético do(s) íman(es) no rotor. Na figura seguinte encontra-se uma simplificação de como é criada uma rotação no rotor do motor *BLDC*.

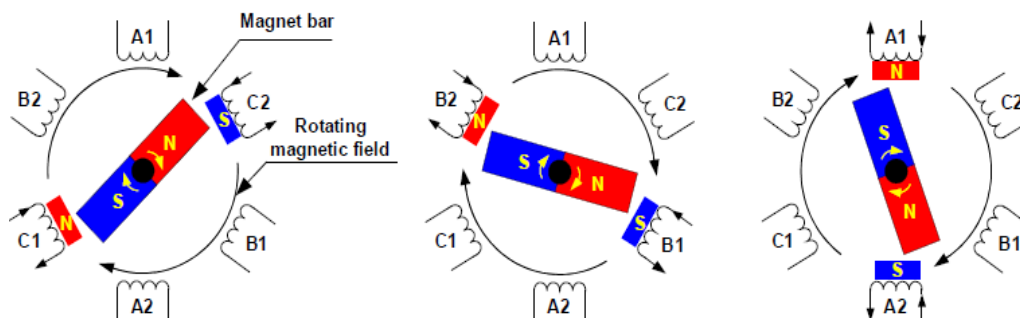


Fig. 4.8 - Simplificação da rotação do rotor de um motor BLDC [24].

A alimentação alternada das fases do estator é gerada através de uma “ponte H trifásica” constituída por *Mosfets*, a qual é controlada por um sinal denominado *PWM (Pulse-Width Modulation)*. São ainda usados os sensores de posição do rotor, de modo a fornecer informação ao controlador, de quando deve alterar a fase excitada. Na Fig 4.9, apresenta-se o circuito elétrico simplificado de uma “ponte H trifásica” utilizado neste tipo de controlo de velocidade dos motores *BLDC* [24].

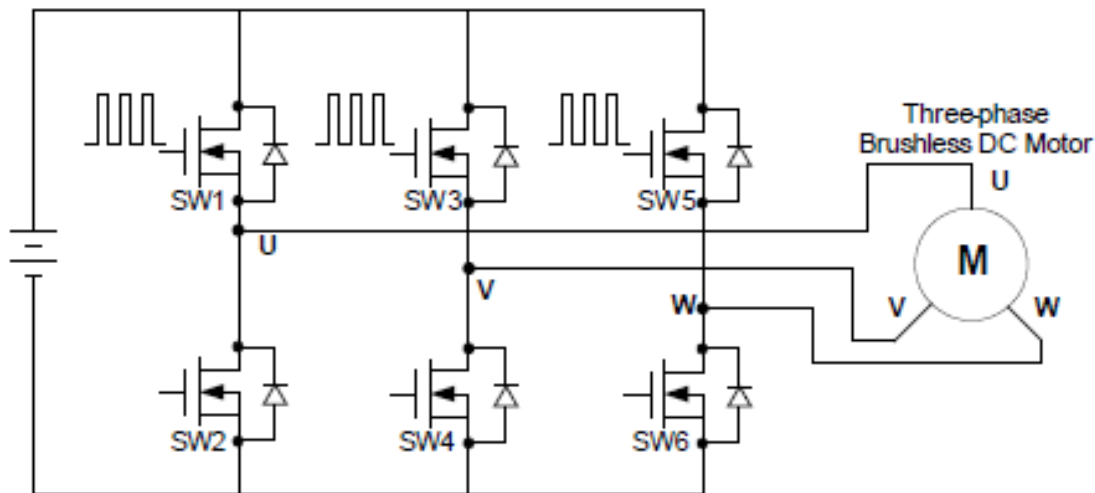


Fig. 4.9 - Circuito simplificado de uma ponte H trifásica, usada nos circuitos de controlo de velocidade de motores BLDC [24].

Esta subsecção tem como objetivo a familiarização do funcionamento dos controladores de velocidade de motores *BLDC*, explicando de modo geral o funcionamento do circuito de controlo. Não há uma explicação rigorosa, devido a esse não ser o objetivo da dissertação. Deste modo, compreende-se o porquê de os motores *BLDC* necessitarem um circuito de controlo, devido à inexistência de escovas para a comutação das fases.

4.5.2. Seleção do controlador de velocidade

Usando os valores, obtidos nas subsecções anteriores, das características elétricas do motor, procedeu-se à pesquisa do controlador adequado para o sistema projetado nesta dissertação. Depois de analisar diferentes opções no mercado, encontrou-se o controlador de velocidade de motores *BLDC* adequado. Na Tabela 16 encontram-se as características principais do controlador encontrado [25].

Tabela 16 - Características principais do controlador escolhido para o veículo [25].

Controlador KBS72121X	
Características Principais	Valor
Intervalo da tensão da bateria [V]	18 a 90
Corrente máxima do motor [A]	130 (durante 10 [s])
Corrente em contínuo do motor [A]	60
Intervalo da temperatura de funcionamento [°C]	-40 a 100
Frequência de operação [kHz]	16,6

Podemos verificar que o controlador oferece a corrente contínua requerida pelo motor de 60 [A]. No caso da corrente máxima habilitada ao motor pelo controlador ser de 130 [A], não fornece problemas, visto ao circuito de proteção da bateria só habilitar a passagem de 80 [A]. As outras características, como o intervalo da tensão e, principalmente, o intervalo da temperatura de funcionamento, são características ideais para este sistema. O resto das características encontram-se no *datasheet* fornecido pelo fabricante.

Deste modo, o controlador do motor escolhido para este veículo, é encontrado na figura 4.10.



Fig. 4.10 - Controlador de velocidade de motores *BLDC*, denominado por *KBS72121X* pelo fabricante Kelly [25].

Capítulo 5

5. Produto final

Dimensionados os componentes principais do veículo segue-se o projeto *CAD* do produto desenvolvido. Para este propósito usou-se o programa de desenho *CAD* chamado *Solidworks*. Nas subsecções seguintes, apresentam-se não só os desenhos *CAD* do produto final, bem como o estudo de tensões realizado usando o mesmo programa, de forma a confirmar o bom projeto do veículo. Encontram-se ainda todas as características finais do veículo, desde as capacidades mecânicas, as capacidades elétricas e o circuito elétrico final, e ainda uma pequena análise económica do produto final.

5.1. Desenho *CAD*

Esta seção apresenta o desenho *CAD* do veículo desenvolvido ao longo desta dissertação, demonstrando, não só a disposição final, com a devida justificação, de todos componentes usados, como também toda a mecânica envolvida da dobragem do veículo para efeitos de arrumação ou transporte.

Na figura seguinte, pode-se observar o veículo eletromecânico, com o objetivo de transporte de uma pessoa por terrenos com grande quantidade de neve, como um produto final. É ainda, possível constatar toda a distribuição dos componentes utilizados neste veículo.



Fig. 5.1 - Desenho *CAD* do veículo desenvolvido nesta dissertação.

A Fig. 5.2 demonstra a possível dobragem do veículo que é oferecida ao utilizador. Esta dobragem foi desenvolvida, de modo a facilitar tanto a arrumação como o transporte do próprio veículo (ex.: numa mala de um carro).



Fig. 5.2 - Desenho CAD do veículo dobrado.

Os componentes mecânicos que permitem a dobragem demonstrada anteriormente, são apresentados nas figuras seguintes. Estes consistem em eixos de rotação, dobradiças e um componente estilo trinco, que foi desenvolvido com o intuito de restringir o movimento do quadro.

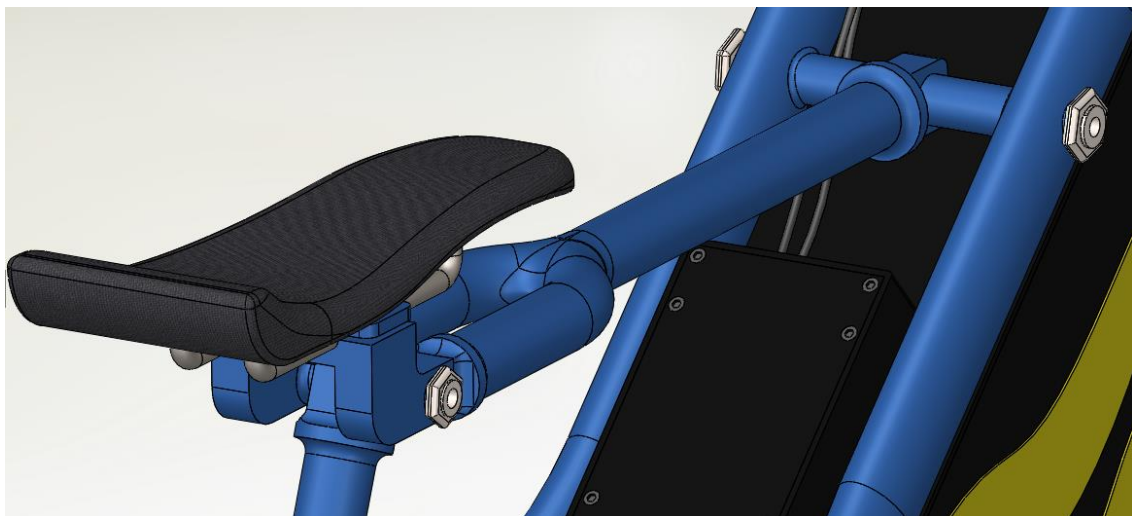


Fig. 5.3 - Primeira ligação, entre o quadro e o banco, permitindo a dobragem do veículo.



Fig. 5.4 - Segunda ligação, entre banco e a estrutura principal da lagarta, permitindo também, a dobragem do veículo.

As duas figuras anteriores, demonstram como é permitido a dobragem do conjunto do quadro do veículo. Pode-se observar que o quadro é composto por três estruturas principais, onde a ligação entre elas é realizada através de um eixo, que permite movimento num grau de liberdade.

Na Fig. 5.5, encontra-se o componente mecânico desenvolvido de forma a trancar o movimento entre a estrutura principal do quadro e a estrutura principal da lagarta, quando o veículo está em movimento. Tem como objetivo criar duas ligações físicas entre o quadro e a estrutura da lagarta, prevenindo assim a dobragem. Quando se pretende dobrar o veículo, basta puxar os trincos do componente de forma a que os veios sejam desconectados da estrutura da lagarta, existindo assim apenas um ponto de ligação (veio de tração) entre as duas estruturas, possibilitando assim toda a dobragem do veículo.

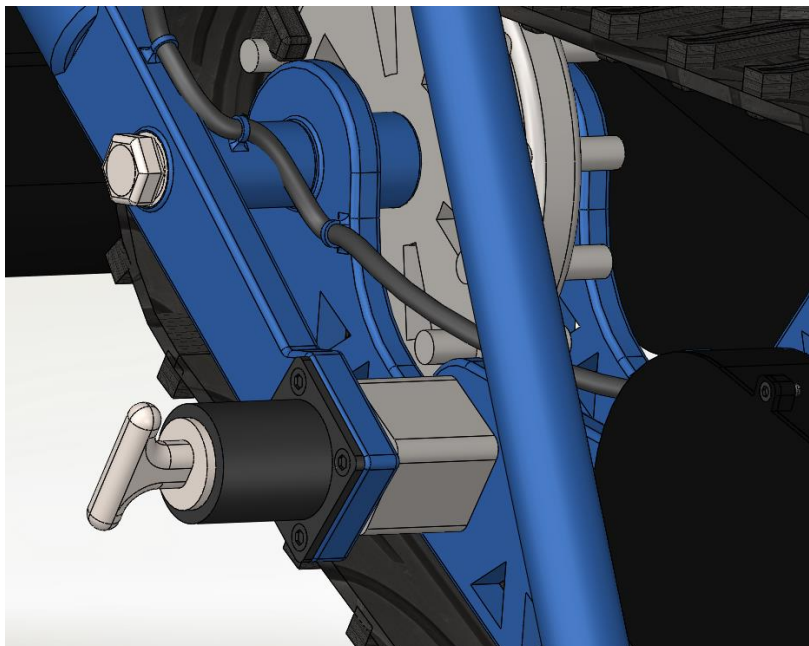


Fig. 5.5 - Componente desenvolvido para permitir a conexão ou desconexão entre o quadro e a estrutura principal da lagarta.

Para a dobragem da parte frontal do veículo, existe uma dobradiça no meio do garfo. O movimento da dobradiça, quando o veículo não está dobrado, é bloqueado por uma chapa que prende a parte superior e a parte inferior do garfo, através de um parafuso. Assim, para a dobragem, basta retirar essa chapa, desapertando o parafuso, procedendo então à dobragem do garfo.

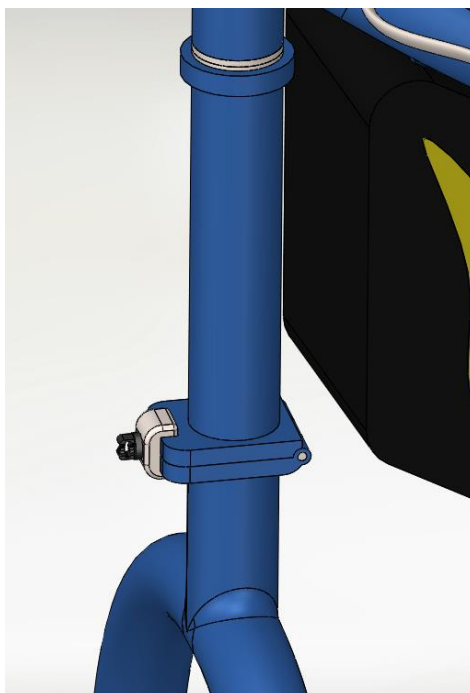


Fig. 5.6 - Dobradiça e trinco, que permite a dobragem entre as duas metades do garfo do veículo.

Por fim, são demonstradas as caixas protetoras que envolvem tanto os componentes elétricos, como os componentes de transmissão de potência para a roda motriz, como modo de proteger dos elementos do exterior.

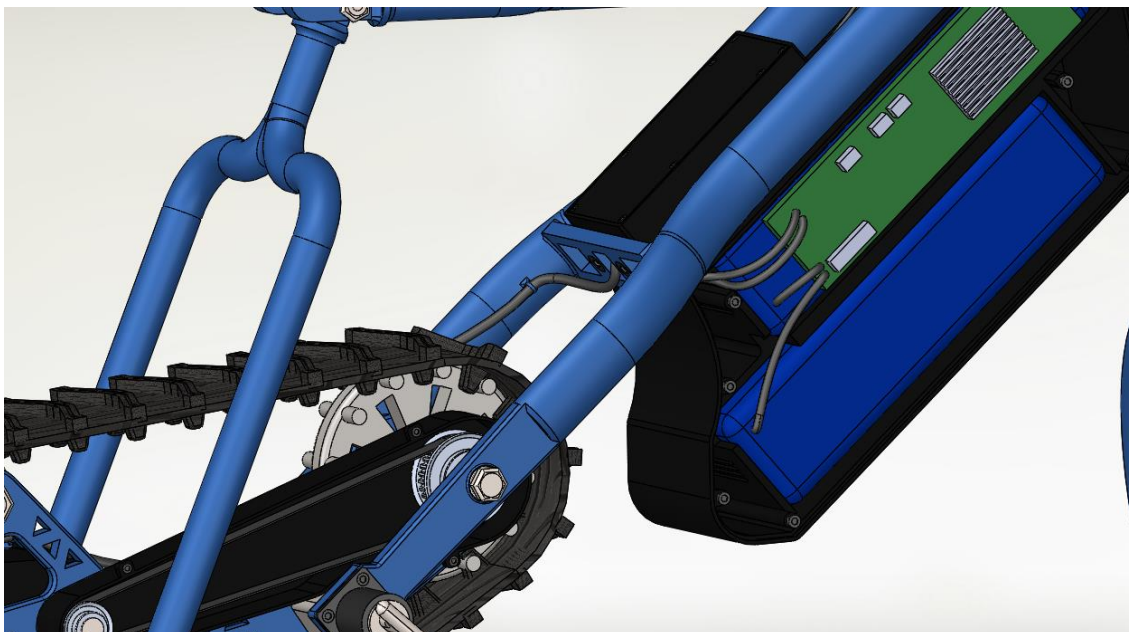


Fig. 5.7 - Caixa de proteção da bateria e da segunda redução de velocidade do motor.

Nesta figura pode-se verificar a presença de duas baterias. Estas baterias encontram-se ligadas em paralelo equivalendo assim à bateria desenvolvida no capítulo dos dimensionamentos. Esta opção resultou devido à presença de um espaço reservado para a caixa da bateria.

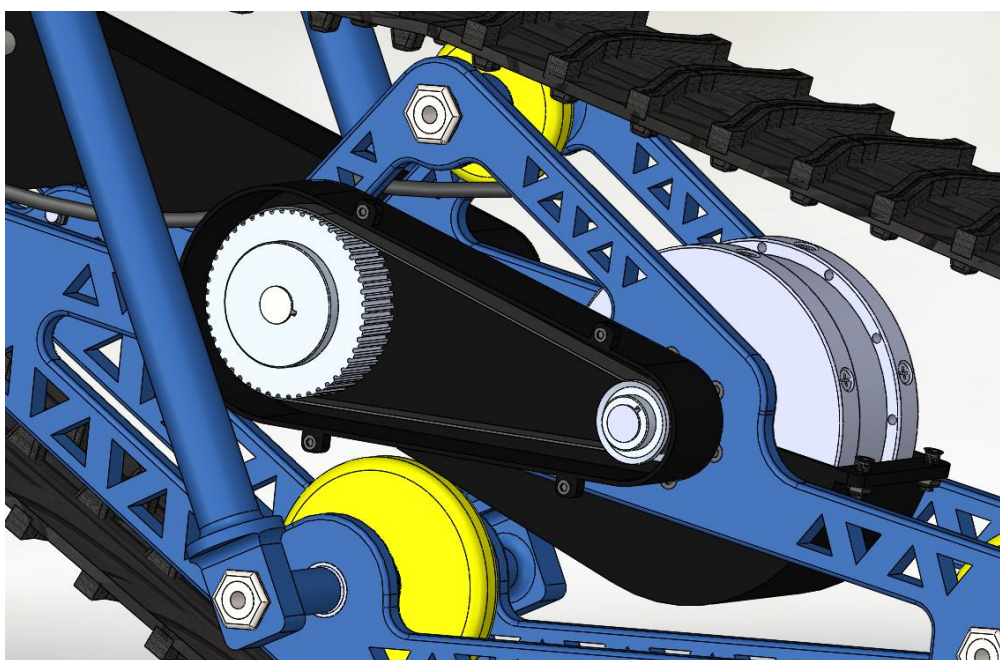


Fig. 5.8 - Caixas de proteção da primeira redução e do motor do veículo.

5.2. Estudo concentração de tensões

Na subsecção decorrente apresentam-se imagens das análises de tensões realizadas no veículo desenvolvido nesta dissertação. Estas análises têm como objetivo a verificação de possíveis pontos de concentração de tensões, que poderiam colocar em risco toda a estrutura do veículo.

As análises foram realizadas com apenas a estrutura principal do veículo, com o objetivo de possibilitar e facilitar o programa *CAD Solidworks*, procedendo assim aos cálculos necessários para apresentar as figuras seguintes. É de notar que a escala é aumentada de modo a fornecer uma melhor visualização tanto dos pontos de concentração de tensões, como das deformações.

Em primeiro lugar, temos duas figuras que demonstram o estudo das reações das tensões aplicadas ao veículo, desde o peso combinado do veículo e passageiro, o binário do motor e a gravidade. Como apoios, encontram-se os veios das rodas que tocam no solo. Neste caso, não foi usado o volante e/ou skis como apoio, pois a totalidade da estrutura ficaria sobre apoiada, impossibilitando a análise de tensões.

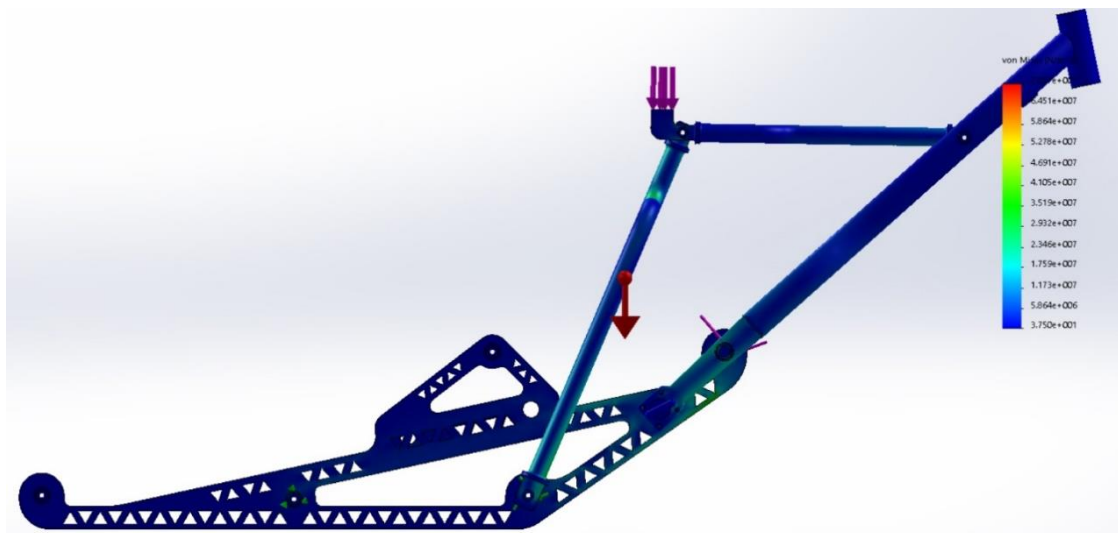


Fig. 5.9 - Análise de tensões estáticas no veículo, usando o critério de *von Mises*, fornecido pelo programa de *CAD*.

A Fig. 5.10 demonstra mais detalhadamente os pontos de maior tensão, sendo estes os locais a verde e amarelo na figura. Pode-se verificar que não existem grandes pontos de concentração de tensões, o que equivale a um bom dimensionamento.

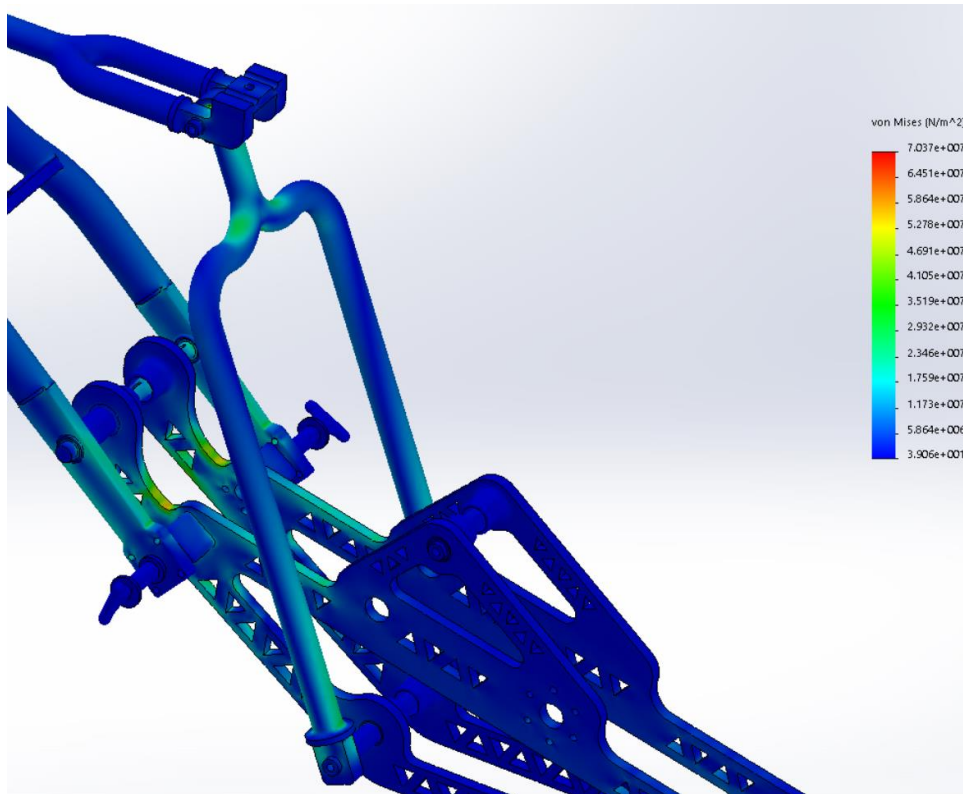


Fig. 5.10 - Análise, mais detalhada, das concentrações de tensões no veículo, usando o critério de *von Mises*, fornecido pelo programa CAD.

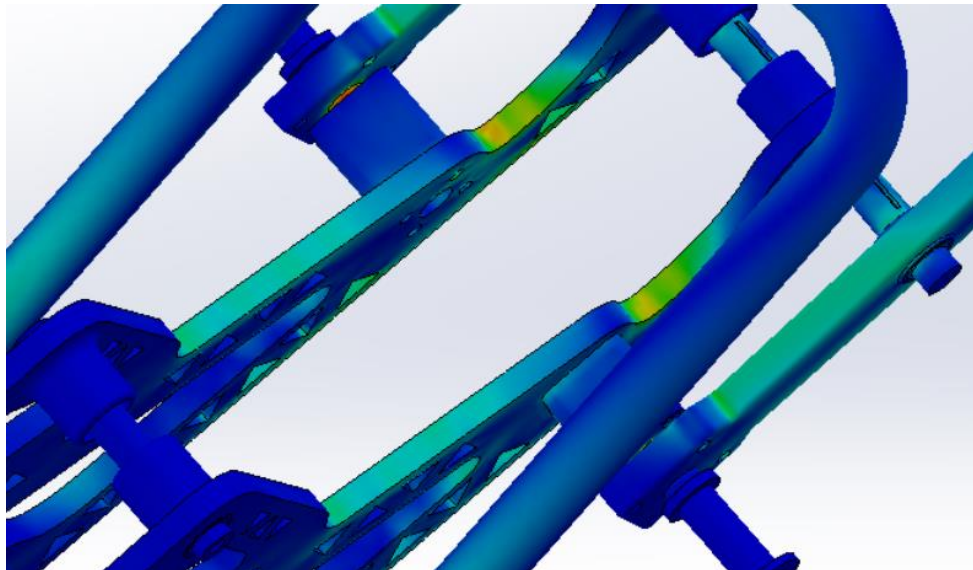


Fig. 5.11 - Análise das concentrações de tensões no veículo, da estrutura principal da lagarta, usando o critério de *von Mises*, fornecido pelo programa CAD.

Um outro ponto mais crítico, em termos de tensões de *von Mises*, na Fig. 5.11, é o veio do trinco mencionado na Fig. 5.5, sendo este o componente que faz a ligação física entre o quadro do veículo e a estrutura principal da lagarta. Mesmo marcado a vermelho - pois a escala foi aumentada de forma a facilitar a visualização das concentrações de tensões - não é caso de

preocupação, pois o valor (70 [MPa]), é perto de metade da tensão admissível pelo material desse veio. Pois a escala foi aumentada de forma a facilitar a visualização das concentrações de tensões.

Para finalizar, encontra-se de seguida, uma figura com o deslocamento provocado pelos esforços aplicadas no veículo. Na imagem pode verificar-se que, ao colocar os apoios nos eixos da lagarta, o deslocamento ocorre na parte frontal do veículo, tratando-se de um deslocamento de apenas de 1,5 [mm], admitindo que não existe apoio na parte frontal.

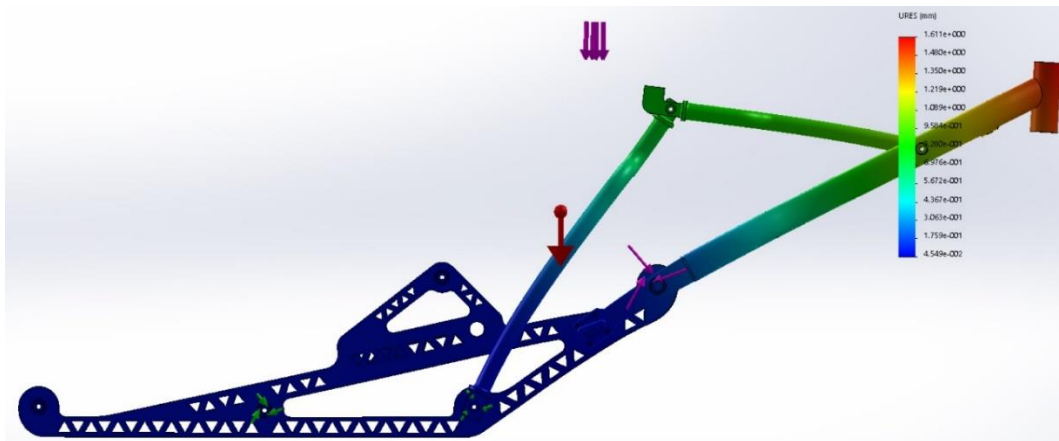


Fig. 5.12 - Análise do deslocamento provocado pelas forças aplicadas no estudo.

5.3. Características finais

Nesta dissertação foi desenvolvido um veículo eletromecânico com a capacidade de transportar um passageiro através de terrenos com grandes quantidades de neve recente. Este veículo possui características que lhe conferem destaque no mercado em que se encontra, sendo estas:

- O veículo possui a capacidade de ser dobrado, quando não está em funcionamento, de modo a permitir tanto uma arrumação como um transporte simplificado;
- Contém equipamento eletromecânico que lhe fornece uma potência de 3 [kW] durante 23 minutos. Esses equipamentos encontram-se isolados com caixas de plástico, para prevenção de possíveis avarias causadas pelo contacto com os elementos exteriores;
- Usufrui de um *display* que permite a visualização e o acompanhamento do estado da bateria conforme o uso do veículo, um botão *ON/OFF* para ligar e desligar o veículo, e ainda um conector na caixa das baterias para facilitar o carregamento. Como forma de controlar a velocidade do motor, existe um acelerador e um travão elétrico;
- A maioria dos componentes mecânicos e da estrutura do veículo são fabricados com material inoxidável, de modo a prevenir a corrosão do equipamento.

Na tabela seguinte encontram-se ainda os dados técnicos do veículo desenvolvido nesta dissertação. Estes são valores máximos considerando terrenos com neve recente, e com uma inclinação de 20°. O motor encontra-se limitado a 3 [kW].

Tabela 17 - Dados das características técnicas do veículo desenvolvido.

Características	Dados
Potência	3 [kW]
Autonomia à potência máxima	23 [min] ou 4 [km]
Carga máxima	92 [kg]
Velocidade máxima	10 [km/h]
Inclinação do terreno	20 [°]
Peso	28 [kg]
Dimensões	1950x750x510 [mm]
Dimensões dobrado	1080x745x510 [mm]
Preço aproximado de construção ⁴	2,500 [€]

5.4. Circuito elétrico do veículo

Na figura seguinte, encontra-se o diagrama esquemático do circuito elétrico do veículo, demonstrando as ligações entre os vários componentes elétricos do sistema. Estas ligações não representam o número de fios que se encontram entre cada componente elétrico, sendo apenas, uma esquematização simplificada para a compreensão de todo o sistema elétrico.

⁴ O preço aproximado da construção do veículo é um valor estimado, que resultou da análise dos preços dos componentes existentes no mercado, bem como uma estimativa do preço da estrutura principal do veículo.

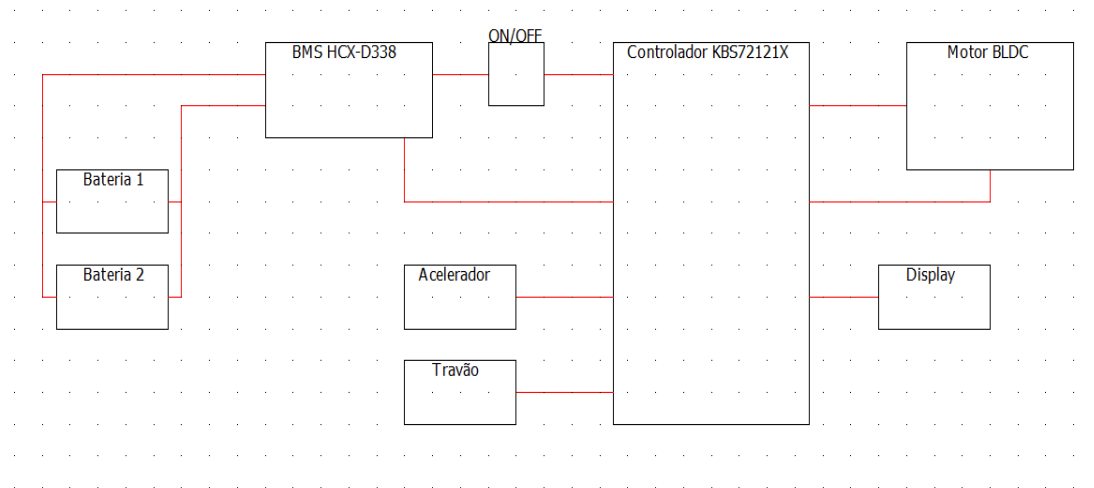


Fig. 5.13 - Diagrama das ligações elétricas do veículo desenvolvido.

Na Fig. 5.14, encontra-se a representação do circuito elétrico do veículo, apresentando as ligações elétricas feitas ao controlador escolhido. Este circuito é fornecido pelo fabricante do controlador, de modo a facilitar o uso e a montagem do controlador.

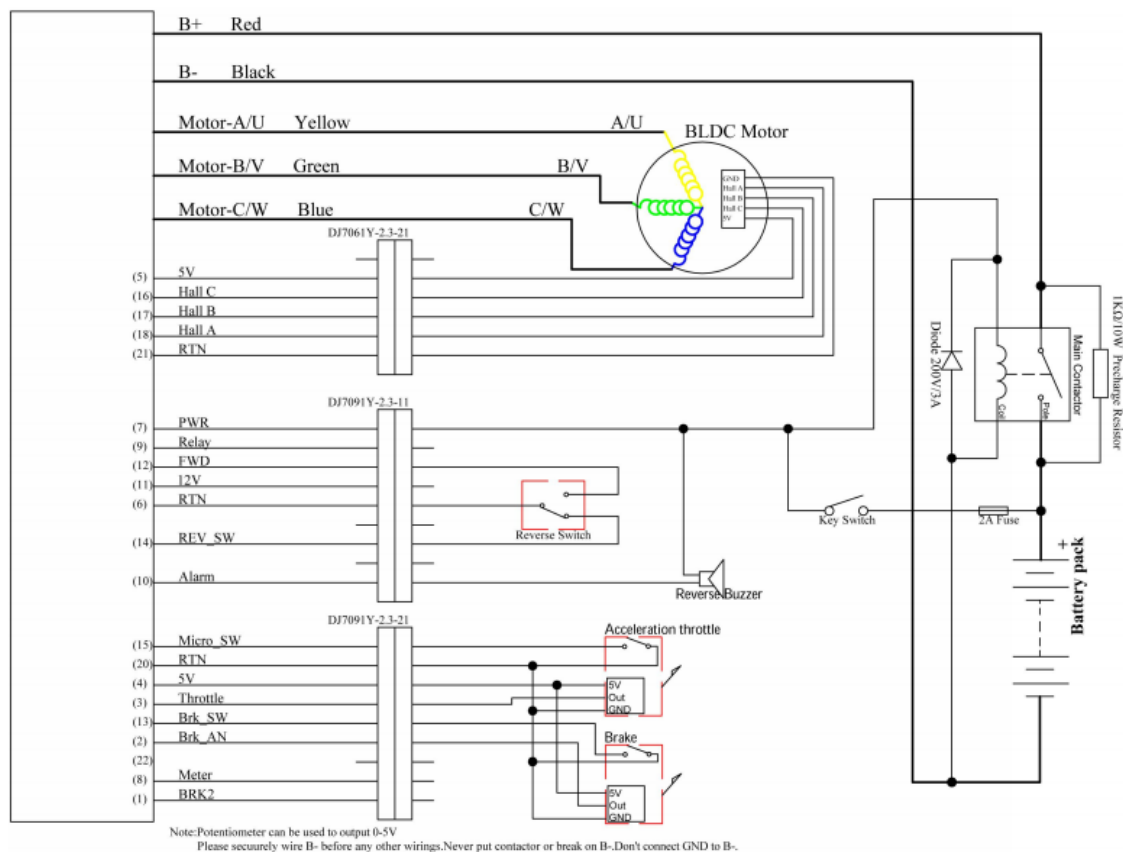


Fig. 5.14 - Circuito elétrico requerido pelo controlador [25].

Capítulo 6

6. Conclusões e considerações finais

Sendo o capítulo final, este resume-se a uma análise generalizada a todo o processo do desenvolvimento de um veículo eletromecânico para transporte de uma pessoa, em terreno com neve, ocorrido nesta dissertação. É concluído assim, com um balanço geral, falando dos objetivos atingidos, melhorias que poderão ser realizadas e ainda possíveis trabalhos futuros.

6.1. Objetivos atingidos

O objetivo principal da dissertação era desenvolver e projetar um veículo eletromecânico capaz de transportar uma pessoa através de terrenos com grandes quantidades de neve. O veículo foi dimensionado para se deslocar em neve recente, sendo esta o tipo de neve que oferece maior resistência ao movimento do veículo. O projeto deste veículo teve como objetivo oferecer um meio de transporte alternativo, comparando com motas de neve, ou mesmo até elevadores ou transportadores localizados em estâncias de ski.

Era importante ainda, que o veículo possuísse a capacidade de ser dobrado de modo a ser transportado ou arrumado mais facilmente, tanto em casa como no carro. Este objetivo foi conseguido graças ao sistema demonstrado no capítulo anterior.

A maior dificuldade encontrada foi a constante tentativa de manter baixo o peso do veículo, o que devido, principalmente, à grande potência necessária para vencer as forças de resistência da neve, se tornou num processo difícil.

Comparando assim, com os produtos concorrentes, este veículo fornece uma boa potência mecânica, sendo capaz de transportar um passageiro através de terrenos deformáveis, durante um razoável tempo. Fornece ainda a distinguível característica de poder ser dobrado, possuindo ainda uma redução de sete vezes o peso de uma mota de neve.

6.2. Possíveis melhorias

No decorrer do desenvolvimento do veículo, detetaram-se algumas características que poderiam ser adicionadas ou melhoradas de forma a aumentar a qualidade do produto. Uma dessas características seria a adição de baterias removíveis, isto é, quando o cliente usufruísse do total de autonomia da bateria, seria possível trocá-la no local por outra, sem ter que abrir a caixa de proteção das baterias, trocar cabos, etc.

Outras melhorias possíveis seriam, um para-lamas na lagarta, eletrificar a dobragem do veículo, e ainda uma análise mais detalhada e morosa ao design do veículo, com o intuito de baixar ainda mais o seu peso.

6.3. Trabalhos futuros

Com o decorrer do tempo, é muito provável que sejam lançados novos motores, com uma melhor relação peso e potência, tornando assim possível o melhoramento do veículo, tornando-o mais eficiente, menos pesado, e talvez mais barato. Mesmo para o caso de as melhorias mencionadas na subseção anterior serem adicionadas, representa uma versão melhorada deste veículo.

Outro projeto ponderado seria um *gadget* parecido com uma mochila, que teria um objetivo parecido ao do veículo desenvolvido nesta dissertação. Mas neste caso seria para transporte de praticantes de snowboard, desde a base da montanha, até o pico. Seria assim uma alternativa ao uso de helicópteros, pois não existe nenhuma outra solução para este problema.

Para finalizar, o veículo desenvolvido é uma boa solução para o problema descrito ao longo desta dissertação, fornecendo alternativas de deslocação aos praticantes de desportos de inverno, ou simplesmente a clientes que se queiram deslocar em locais com neve.

Referências Bibliográficas

- [1] D. Osinski, K. Szykiedans, "Simulation Model of Small Screw-Propelled Vehicle", *Machine Dynamics Research*, 2014.
- [2] J.T. Freeberg, "A Study of Omnidirectional Quad-Screw-Drive Configurations for All-Terrain Locomotion", *Graduate Theses and Dissertations, University of South Florida*, 2010.
- [3] K. Terzaghi, "Theoretical Soil Mechanics", *Chapman and Hall*, 1943.
- [4] A. T. Le, "Modelling and Control of Tracked Vehicles", Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, University of Sydney, 1999.
- [5] M. G. Bekker, "Theory of Land Locomotion", The University of Michigan Press, 1962.
- [6] J. Y. Wong, J. A. R. Reece, "Soil failure beneath rigid wheels", Proceeding 2nd International Conference of the International Society for Terrain Vehicle Systems, Toronto, 1966.
- [7] J. Y. Wong, "Behavior of soil beneath rigid wheels", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1967.
- [8] L. L. Karafiath, "Soil Mechanics for Off-road Vehicle Engineering, Trans Tech, 1978.
- [9] M. G. Bekker, "Introduction to Terrain-Vehicle Systems", The University of Michigan Press, 1969.
- [10] B. M. D. Wills, "The measurement of soil shear strength and deformation modulus and a comparison of the actual and theoretical performance of a family of rigid tracks", *Journal of Agricultural and Theoretical Research*, 1963.
- [11] J. Y. Wong, J. Preston-Thomas, "Investigation into the effects of suspension characteristics and design parameters on the performance of tracked vehicles using an advanced computer simulation model", *Proceeding Institution of Mechanical Engineering*, 1988
- [12] J. Y. Wong, "Computer aided analysis of the effects of design parameters on the performance of tracked vehicles", *Journal of Terramechanics*, 1986
- [13] A. R. Reece, "Principles of soil-vehicle mechanics", *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers*, 1965-1966

- [14] J. Y. Wong, "Theory of Ground Vehicles", Wiley, New York, 1989
- [15] M. G. Bekker, "Bekker's Terramechanics Model for Off-road Vehicle Research", 1990.
- [16] P. Yedamale, "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals", Microship Technology Inc, 2003
- [17] Breco Zahnriemen, Brecoflex Zahnriemen, "Breco, Brecoflex, Timming Belts Catalog", [Online]. Available: <http://www.breco.de>. [Acedido em 17 06 2017]
- [18] B&B Manufacturing, "B&B Manufacturing Belt Length Calculator", [Online]. Available: <https://www.bbman.com/belt-length-calculator/>. [Acedido em 17 06 2017]
- [19] Department of Mathematics and Computer Science, "Bateries for Mobile Robots", [Online]. Available: <http://www.inf.fu-berlin.de/lehre/WS02/robotik/Vorlesungen/Vorlesung5/ComparisonBattery.pdf> [Acedido em 05 07 2017]
- [20] Rc-eletronics, "Introduction of NCR19650PF", Panasonic catalog [Online]. Available: http://www.rc-electronic.com/downloads/pdf/infos/datasheet_Lilo_Panasonic.pdf. [Acedido em 5 07 2017]
- [21] REVOLT, "RV-120 MODEL ", [Online]. Available: <http://www.revolt.org.il/rv-120-model/rv-120-short/>. [Acedido em 14 06 2017]
- [22] BesTech Power, Manufacturer of BMS, "51,8V Li-ion 14S 80A BMS", [Online]. Available: <http://www.bestechpower.com/518v14spscmbmspcbforsli-ionli-polymerbatterypack/BMS-D338.html> [Acedido em 21 07 2017]
- [23] Electropaedia, "Battery and Energy Technologies", [Online]. Available: <http://www.mpoweruk.com/motorsbrushless.htm>. [Acedido em 14 06 2017]
- [24] J. Zhao, Y. Yu, "Brushless DC Motor Fundamentals Application Note", MPS, 2011
- [25] Kelly, "KBS72121X Mini Brushless DC Controller", [Online]. Available: <http://kellycontroller.com/kbs72121x55a24-72v-mini-brushless-dc-controller-p-529.html>. [Acedido em 05 08 2017]